



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FINAL DE GRAU

TÍTULO DEL TFG: Estudio del estado de las tecnologías HAPs

TITULACIÓ: Grau en Enginyeria de Sistemes de Telecomunicació

AUTOR: Marc Vall Gonzàlez

DIRECTOR: Eduard Bertrán Alberti

DATA: 24 de octubre del 2019

Título: Estudio del estado de las tecnologías HAPs

Autor: Marc Vall Gonzalez

Director: Eduard Bertrán Alberti

Data: 24 de octubre de 2019

Resumen

En este proyecto se hará un estudio sobre las principales características que tienen los sistemas HAPs actualmente, se analizarán los principales desarrollos, regularizaciones aplicaciones y el futuro que se prevé en estos pseudo satélites.

En el primer apartado vamos a introducir el concepto HAPs y a explicar brevemente los diferentes tipos de HAPs que podemos encontrar y enumerar varios de los proyectos que se encuentra activos.

Una vez introducido el concepto HAPs, vamos a enumerar las limitaciones que debemos tener en cuenta al realizar el despliegue de las plataformas, las limitaciones que encontraremos a nivel de telecomunicaciones y a nivel aeronáutico.

Seguidamente, vamos a enumerar los posibles escenarios donde se podría desplegar la tecnología HAPs, tanto a nivel de usuario como a nivel de gateway, y algunos posibles escenarios en el futuro. A continuación, se enumerarán los aspectos técnicos se requieren para el funcionamiento idóneo de los enlaces HAPs, las antenas usadas, las dificultades que nos encontraremos en el canal de transmisión, la fuente de energía que usaremos, ...

Mencionaremos las aplicaciones que nos pueden ofrecer las plataformas HAPs y su estado actual. Introduciremos las aplicaciones de HAPs para los servicios de banda ancha, mencionando también las posibles futuras aplicaciones de 3D y 5G. También explicaremos el uso de HAPs para las aplicaciones de observación de la tierra y teledetección.

Finalmente, enumeraremos las ventajas y desventajas que obtendríamos con la implementación de los sistemas HAPs en la actualidad, haciendo mención a la reunión del WRC-19 que se celebrará a partir del próximo 28 de octubre, la cual puede influenciar notablemente el futuro de los HAPs. También haremos una pequeña introducción al estado del mercado en los sistemas HAPs.

Title: Estudio del estado de las tecnologías HAPs

Author: Marc Vall González

Director: Eduard Bertrán Alberti

Date: 24 th October 2019

Overview

In this project, a study will be carried out of the main characteristics that HAPs systems currently have, the main developments, regularizations, applications and the future of these pseudo satellites.

In the first section, we will introduce the HAPs concept and briefly explain the different types of HAPs that we can find and enumerate some projects that are active.

Once the concept of HAPs has been introduced, we are going to enumerate the limitations that we must consider when performing HAPs platform deployments, the limitations we find are in the area of telecommunications and in the area of aeronautics.

Next, we are going to list the possible scenarios where the HAPs technology could be deployed, at the user level and at gateway level, and some possible scenarios in the future. Next, the technical aspects required for the proper functioning of the HAPs links will be listed the antennas used, the difficulties that we will find in the transmission channel, the source of energy that we will use, ...

We will mention the applications that HAPs platforms can offer us and their current state. We will introduce HAPs applications for broadband services, also mentioning possible future 3D, using drones, and 5G applications. We will also explain the use of HAPs for Earth observation and remote sensing applications.

Finally, we will enumerate the advantages and disadvantages that we would obtain with the implementation of HAP systems today, mentioning the WRC-19 meeting that will be held from October 28, which can significantly influence the future of HAPs. We will also make a small introduction of the market in HAPs systems.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ¿Qué es un HAPs?	1
1.2 Tipos de HAPs	2
1.3 Historia	3
1.4 Proyectos activos en Europa	4
1.4.1 ZEPHIR	4
1.4.2 Stratobus	4
2. ASPECTOS REGULATORIOS	6
2.1 Limitaciones en el ámbito de las telecomunicaciones	6
2.1.1 ITU	6
2.1.2 WRC-15	7
2.2 Limitaciones en el ámbito de la aeronavegación	9
3. ESCENARIOS DE DESPLIEGUE	12
3.1 Escenarios presentes	12
3.1.1 Enlaces de usuario de HAPs	12
3.1.2 Enlaces gateway de HAPs	13
3.2 Nuevos escenarios	14
4. ASPECTOS TÉCNICOS	16
4.1 Antenas	16
4.1.1 Requerimientos para los HAPs	16
4.1.2 Tipos de antena usadas	17
4.1.3 Recomendaciones a seguir	19
4.1.4 Materiales usados	19
4.2 Modelo de canal	20
4.2.1 Aspectos de radiopropagación en enlaces HAPs	20
4.2.2 Efectos atmosféricos	21
4.2.3 Aproximaciones del modelo	22
4.2.4 Estudio de la penetración en los edificios	22
4.3 Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)	23
4.4 Fuentes de energía	23
4.5 Enlaces ópticos	24
4.6 HAPs versus Satélites	25
5. APLICACIONES HAPS	27
5.1 Aplicaciones de banda ancha	27
5.1.1 Arquitectura de red	28

5.1.2 HAPs de banda ancha para aplicaciones específicas	29
5.1.3 3D	30
5.1.4 HAPs para comunicaciones 5G.	31
5.2. HAPs como infraestructura complementaria para la observación de la Tierra y la teledetección.....	32
5.2.1 Introducción a observación de la Tierra y teledetección	32
5.2.2 Ejemplos de aplicaciones de observación de Tierra y teledetección.	36
6. ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS HAPs	38
6.1 Ventajas y características de HAPs	38
6.2 Principales riesgos de los HAPs	39
6.3 WRC-19 punto 1.14	40
6.3.1 Resumen y análisis de los resultados de los estudios del ITU-R	41
6.3.2. Métodos para cumplir el punto del día.	43
6.4 Futuros desafíos de investigación y desarrollo	45
7. RUTAS DE MERCADO	46
8. CONCLUSIONES	48
BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS	50
LIBROS.....	50
ARTICULOS EN REVISTAS	50
SITIOS WEB.....	51

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ¿Qué es un HAPs?

Un HAPs (High Altitude Pseudo Satellite) es un satélite artificial de comunicaciones que opera en la estratosfera, en un rango de alturas comprimido entre los 20-22 Km sobre el nivel del mar, altura donde los vientos tienen menor velocidad y donde no afecta a vuelos comerciales. Se puede tratar tanto de aeronaves, globos o dirigibles dependiendo de la operación y de la zona donde tiene de operar.

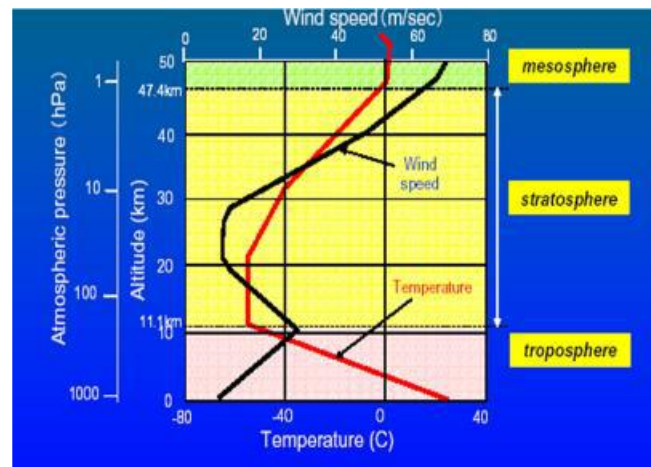


Fig.1.1 Presión atmosférica, velocidad del viento y temperatura en función de la altitud.

En los últimos años los HAPs han estado en el punto de mira tanto de investigadores y científicos, como de empresas o del ejército, estos últimos fueron los primeros de usarlos con fines de observación y comunicaciones estratégicas. Los HAPs son una alternativa más rentable a los satélites, no contaminan y la latencia y las pérdidas son menores. Con la implementación de HAPS con los sistemas de infraestructura terrestre, estos ayudaran a superar las restricciones ambientales que afectan a la propagación de ondas y pudiendo reducir el multipath.

Por lo tanto, los HAPs se consideran una solución intermedia entre los satélites y las infraestructuras de redes terrestres, aumentando la capacidad y la eficiencia al proporcionar servicios de banda ancha. Los HAPs pueden ofrecer a los

satélites una oportunidad de mercado pudiendo interactuar con ellos y poder formar varias redes satélite-HAPs.

Los HAPs vuelan sobre una zona dada para proporcionar servicios de comunicación a los usuarios situados dentro del radio circular, comunicándose con los terminales fijos situados dentro del área de servicio. Al largo del ciclo de vuelo del HAP pueden sufrir cambios en su altitud, se debe tener en cuenta a para limitar su radio de cobertura, ya que este varía con su ángulo de respecto al eje vertical.

El sistema de HAPs es una nueva tecnología en investigación y todavía no se pueden encontrar demasiados artículos relacionados con ellos, se proporciona una visión de los HAPs desde las definiciones muy básicas reflejadas en la ITU a aspectos más avanzados relacionados con aplicaciones e implementación en proyectos de telecomunicaciones, se tiene en cuenta la estructura del sistema, las posibles bandas de frecuencias asignadas, diseño de la red y modelo de propagación. Algunos de los problemas que se pueden encontrar en los HAPs según los artículos son la movilidad de la plataforma, aerodinámica, problemas entre los enlaces entre varias plataformas o satélites y problemas en las fuentes de alimentación.

1.2 Tipos de HAPs

Se han definido dos modelos de HAPs, las plataformas más pesadas que el aire (Heavier-than-Air Platforms, HTA) y las plataformas más ligeras que el aire (Lighter-than-Air Platforms, LTA).

Los HTA son aeronaves, tanto de ala fija como de ala rotatoria con un sistema de energía recargable, que tiende a ser energía solar, así usa la energía durante el día y por la noche se alimenta con baterías. Son capaces de volar durante varios días. Este tipo de naves pueden proveer servicio a un radio de 20 a 50 Km y trabajan a una altura entre 18-26 Km.

Los LTA son aeronaves no tripuladas que se mantienen suspendidas en el aire y que usan energía solar para proporcionar energía para moverse durante las rachas de viento. Este tipo de naves son capaces de proporcionar servicio durante varios meses. Este tipo de naves pueden proveer servicio a un radio de 50 Km y trabajan a una altura entre 18-25 Km.

1.3 Historia

La idea de los HAPS remonta a los años sesenta donde se quería despegar redes de globos y aeronaves para proporcionar parcialmente servicios de telecomunicaciones. Fue a finales de la década de los 70 del siglo XX que la tecnología HAPS tiene su punto de partida con una tecnología militar, los UAV, fueron probados por primera vez en USA y Rusia con antiguas aeronaves volando a una altura estratosférica comprimida entre 17-25 Km, su principal finalidad era vigilancia y reconocimiento de objetivos en tierra.

Fue en el año 1974 cuando se llevó a cabo el primer vuelo de un avión solar, el Sunrise I, el cual tenía una envergadura de 35 pies y pesaba 10 Kg. Durante la década de 1980 y a través de la década de 1990, la NASA también probó aeronaves no tripuladas de largas distancia y duración como un medio para recoger datos ambientales en los tramos superiores de la atmósfera. A finales de la década de 1980, la NASA contrató a la firma AeroVironment, que había estado trabajando en un prototipo de aeronave tripulada con energía solar, para desarrollar un avión solar no tripulado de larga duración, el Pathfinder, el cual demostró la viabilidad de usar energía solar para hacer aviones sub-orbitales no tripulados, consiguiendo volar casi a 25 Km de altitud a principios de los años noventa.

A finales de los noventa aumentó la investigación hacia la construcción de plataformas HAPS y su tecnología para poder dar servicios de banda ancha, gracias a proyectos como HeliNet o CAPANINA. Estos proyectos fueron dirigidos tanto como administraciones públicas (NASA, Comunidad Europea, NAL,...) o por compañías privadas. En el caso de la UE se subvencionó el primer proyecto europeo (Helinet) sobre HAPS y la ESA está subvencionando un estudio de viabilidad para plataformas estratosféricas que pueden servir como estaciones base para comunicaciones de banda ancha.

El proyecto CAPANINA [2005] tenía la finalidad de poder proveer servicios de banda ancha desde los HAPS, pero se centraron más en el aspecto de mejorar la nave aerodinámicamente que en la carga útil. Sin embargo, ha sido una referencia para posteriores proyectos.

1.4 Proyectos activos en Europa

En el ámbito europeo dos entidades destacan para desarrollar dos tipos de HAPs con distintas tecnologías, Airbus y Thales. Airbus sigue la línea de mejorar una aeronave de ala fija, motores eléctricos y paneles solares en sus alas. Thales intenta construir un dirigible con los avances tecnológicos actuales, también con paneles solares y motores eléctricos.

1.4.1 ZEPHIR

Este tipo de aeronave fue desarrollada por QinetiQ, luego se unieron Astrium y Airbus. Se ha conseguido una plataforma autónoma y no tripulada, propulsada por energía eléctrica facilitada por energía solar durante el día y por baterías de litio por la noche, teniendo una autonomía de 14 días. Puede volar a una altura de 18 Km, con lo que no interfiere en el tráfico aéreo excepto durante las fases de lanzamiento y recogida. Su principal función es ofrecer servicio de control medio ambiental.



Fig.1.2 ZEPHIR

1.4.2 Stratobus

Stratobus será un dirigible autónomo de misión múltiple con posibilidad de incorporarse a una red de satélites fijos en los que podría servir de relé. En este dirigible se incorpora un equipo óptico con los equipos de RADAR junto a las cargas útiles. Este dirigible vuela cerca de los 20 Km de altura, pesa cerca de las

7 toneladas y es propulsado por cuatro motores laterales eléctricos para mejorar su navegación aérea.

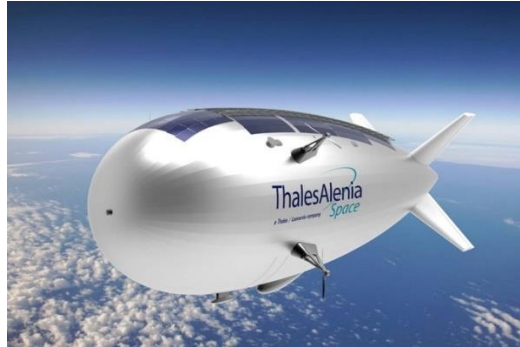


Fig.1.3: Stratobus

2. ASPECTOS REGULATORIOS

Antes de poder implementar la tecnología de los HAPs en un territorio serán necesarias las autorizaciones de las organizaciones a las cuales puede afectar. Normalmente serán las regularizaciones a nivel telecomunicaciones y las regularizaciones aerodinámicas, tanto a nivel nacional como internacional. También será necesario la coordinación con otros organismos para que la implementación de los HAPs no cause interferencia en sistemas que ya están funcionando, como podría ser los servicios satélites. En los apartados 2.1 y 2.2 se podrá ver más detalladamente los aspectos regulatorios tanto a nivel de telecomunicaciones como a nivel de aeronavegación.

2.1 Limitaciones en el ámbito de las telecomunicaciones

2.1.1 ITU

La ITU es la organización que se encarga de regulariza los servicios, redes y sistemas de telecomunicaciones de todo el mundo. Los HAPs, se encuentran en el sector de comunicaciones por radio (ITU-R), que cuenta con varios organismos de estudio y trabajo, y organiza la conferencia mundial de comunicaciones por radio (WRC).

Las reglas las cuales asigna y utiliza el espectro radioeléctrico se encuentran documentadas en el Reglamento de Radiocomunicaciones (RR). Estas reglas las negocian todos los países participantes en la WRC. Las primeras regulaciones para los HAPs aparecieron en la WRC-97 ddefiniéndolos en una categoría distinta a las estaciones base y se decidió una regla provisional. En la actualidad, los HAPs aparecen definidos en el artículo 1.66A de la RR como *“estación en plataforma a gran altitud: Estación situada sobre un objeto a una altitud de 20 a 50 km y en un punto nominal, fijo y especificado con respecto a la Tierra”*.

Es necesario definir todos los aspectos correctamente para poder conseguir mejores beneficios económicos, servicios más eficientes y poder ser compatibles con otras redes. También es necesario definir los aspectos para poder tener interoperabilidad tanto a nivel nacional e internacional. Teniendo definido todos los aspectos obtendríamos beneficios en el momento de su fabricación, mercado competitivo de equipos, mayor eficiencia espectral y mejor respuesta en caso de desastres.

Hoy en día, las frecuencias asignadas para las aplicaciones y servicios de los HAPs se localizan en la banda entre los 47.2-47.5 GHz/ 47.9-48.2 GHz con anchos de banda de 300 MHz. Esta banda de frecuencias es global y están sujetas a condiciones técnicas y regulatorias descritas en las resoluciones 122 y la 145 del WRC. En algunos países hay una banda más reducida de frecuencias para el uso de los HAPs (27.9-28.2 GHz para el downlink – 31-31.3 GHz para el uplink, con 2 anchos de banda de 300 MHz).

Actualmente, con las medidas regulatorias y la actual demanda de servicios de banda ancha, la tecnología HAPs no sería adecuada para el despliegue de servicio de banda ancha, tanto a nivel nacional como internacional.

2.1.2 WRC-15

En el WRC-15 se adoptó la resolución 160 para estudiar como facilitar el acceso a las aplicaciones globales de banda ancha través de los HAPs.

La ITU reconoció que existe una necesidad de espectro para servicios que puedan proporcionar una mayor conectividad de banda ancha en áreas rurales y remotas. También se evaluó la posibilidad de identificar bandas de frecuencia adicionales para HAPs.

Para que la WRC considere las cuestiones planteadas sobre la designación y regulación del uso de HAPs y así tomen medidas apropiadas para el uso de HAPs para servicios de banda ancha, se hablará del uso de HAPs es la mejor opción para el despliegue de servicio de banda ancha en zonas y países con infraestructura menos desarrollada. Este escenario es el que más exigirá en términos de necesidad de ancho de banda. Actualmente, no se contempla el uso de HAPs para competir con los proveedores existentes, sino como una plataforma adicional para aumentar su capacidad.

Las actuales asignaciones para HAPs fueron adoptadas para casos de desarrollo de multi gigabit broadband. Los nuevos anchos de banda de los HAPs no son compatibles con los existentes. Las primeras asignaciones de los HAPs tenían como finalidad la protección de los servicios establecidos, pero tienen problemas para la entrega de servicio de banda ancha a través de los HAPs.

Sabiendo que la próxima generación de HAPs pueden tener un papel importante en el avance de los objetivos de conectividad, concretamente en las zonas menos desarrolladas y con peores infraestructuras, se considerará las regularizaciones apropiadas para facilitar el uso de HAPs que usarán asignaciones de espectro existentes para el servicio fijo, que se comentarán concretamente en el punto 1.14 del próxima WRC-19, el cual introduciremos más adelante.

Actualmente, en la ITU se definen 3 regiones para la asignación de espectro, la Región 1, que incluye Europa, Oriente Medio y África, Región 2, América, Región 3, Asia, y Oceanía. En la siguiente tabla podremos ver las bandas de frecuencias que se pueden usar en las tres regiones.

Banda de frecuencia	Uso	Dirección	Ancho de banda	Uso permitido
6440-6520 MHz	GW	Downlink	80 MHz	5 Admins (R1,R3)
6560-6440 MHz	GW	Uplink	80 MHz	5 Admins (R1,R3)
27.9-28.2 GHz	GW,CPE	Downlink	300 MHz	23 Admins (R1,R3)
31-31.3 GHz	GW,CPE	Uplink	300 MHz	23 Admins (R1,R3)
47.2-47.5 GHz	GW,CPE	Ambos	300 MHz	Mundial
47.9-48.2 GHz	GW,CPE	Ambos	300 MHz	Mundial
Gw: Gateway; CPE: Equipo local de cliente				

Tabla 2.1: Bandas de frecuencia que pueden ser usadas por HAPs

Con el espectro que se puede usar en todas las regiones, no se ofrece suficiente ancho de banda, alcance geográfico o condiciones técnicas para el uso de HAPs para el servicio de banda ancha. Por esta razón, se están investigando bandas de espectro adicionales.

Banda de frecuencia	Uso	Dirección	Ancho de banda	Uso permitido
2.4-22 GHz	GW,CPE	Ambos	600 MHz	R2
24.25-27.5 GHz	GW,CPE	Ambos	3250 MHz	R2
38-39.5 GHz	GW,CPE	Ambos	1500 MHz	Mundial
Gw: Gateway; CPE: Equipo local de cliente				

Tabla 2.2: Bandas de frecuencia investigadas para usar en HAPs

En el diseño de las futuras redes de HAPs, debe tenerse en cuenta la posible interferencia que se pueden generar en los diferentes servicios de telecomunicaciones. Por lo tanto, las asignaciones de espectro y las regulaciones deben ser actualizadas en consecuencia, dependiendo de la región del mundo. Las características que se tienen que considerar son la potencia de transmisión, sensibilidad y selectividad del receptor, diferencia de señales entre la señal interferente y la señal deseada, ancho de banda, medio de transmisión, geometría de todos los elementos del enlace y la densidad de implementación de todos los sistemas que se verán afectados. La ganancia de la antena se tendrá de tener en cuenta para determinar la densidad del haz de potencia en todos sus ángulos e influirá en la efectividad del intercambio.

Existen varias metodologías y estudios para la compatibilidad de los HAPs y los servicios primarios existentes trabajando a las bandas de frecuencias consideradas para los HAPs. La ITU-R está realizando estudios para demostrar la coexistencia entre los nuevos sistemas HAPs y los servicios existentes en las bandas consideradas para HAPs e identificando disposiciones reglamentarias y criterios de protección para minimizar cualquier riesgo de interferencia

2.2 Limitaciones en el ámbito de la aeronavegación

Además de la normativa relacionada con los aspectos radioeléctricos discutidos en las secciones anteriores, desde un punto de vista aeronáutico, en los últimos años no se han realizado progresos suficientes. Aunque hasta ahora no se ha acordado ni publicado ninguna legislación en particular, hay algunas normativas aeronáuticas relevantes que afectan directa o indirectamente a HAPs. Un punto de partida para este esfuerzo ha sido la definición legal de HAPs en la ESA (Agencia Espacial Europea), en octubre del 2017. Un HAPs como *“una estación en un objeto a una altitud de 20 a 50 km y en un punto fijo, nominal y específico relativo a la Tierra”*. Todo tipo de HAPs debe ser considerado como una aeronave.

Los HAPs son plataformas estratosféricas que permanecen sobre un punto fijo en la Tierra durante largos periodos de tiempo. Los HAPs no son objetos espaciales, por lo que las directivas de la Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Ultraterrestre (UNOOSA) no se aplican directamente en caso de utilizar HAPs como soporte para satélites.

Los HAPs son aeronaves no tripulados. Según el párrafo 2.2, Anexo 7 del Convenio de Chicago, *“Una aeronave destinada a ser operada sin piloto a bordo*

se clasificará además como no tripulada". A pesar de ser vehículos aéreos no tripulados (UAV), la legislación recientemente actualizada para drones no puede aplicar a los HAPs, principalmente porque los requisitos de contacto visual con el piloto terrestre (remoto). Sin embargo, algunas de las reglas y normativas para drones se pueden prever fácilmente para HAPs, como la clasificación de problemas legales de acuerdo con el peso / tamaño o tipo de operación (civil, militar o ambos).

También se enfatiza la soberanía de cada estado en la regulación de su espacio aéreo. Además, la seguridad del vuelo debe controlarse de manera segura bajo la responsabilidad de ese estado, evitando cualquier riesgo para las aeronaves civiles. Esto afecta los procedimientos de despegue y aterrizaje para los HAPs, especialmente al cruzar capas de aviones comerciales. Una alternativa podría ser lanzar los HAPs en los espacios aéreos generalmente sobre algunas áreas militares; sin embargo, esta solución solo podría ser válida para HAPs sin globo, capaz de moverse adecuadamente horizontalmente en el aire. De lo contrario, están obligados a alcanzar la estratosfera que se eleva en un cilindro justo sobre el área segregada

La naturaleza de la aeronave de HAPs, con la normativa actual y, aunque no se está implementando una normativa aeronáutica extendida y específica para HAPs, hace que estén en las competencias de la ICAO (Organización de Aviación Civil Internacional) y, por lo tanto, deben cumplirse las normas y prácticas recomendadas (SARP). Estas reglas ya se aplicaron en el Proyecto Loon, donde se aplicaron reglas para la separación y la coordinación, en los escenarios propuestos en Australia, Canadá y Nueva Zelanda.

En Australia, al menos que se apliquen las reglas visuales, las aeronaves no tripuladas no pueden volar por debajo de las 15 millas náuticas, tanto en la fase de ascenso como en la de descenso. Todas las comunicaciones deben de seguir el "Manual nacional de servicios de tránsito" (MATS). Se usará el "Automatic Dependent Surveillance Broadcast" para la coexistencia con los vuelos comerciales tanto en la fase de ascenso como de descenso de la aeronave.

El sistema ADS-B tiene varios modos de operar, el modo A en el que el transpondedor recibe la solicitud de interrogación y este transmite el código del transpondedor configurado que consiste en un código de identificación para la aeronave. En el modo C, se aumenta la información mandada en el modo A con una respuesta de pressure altitude. La información obtenida se muestra en el radar para mantener la separación de la aeronave.

En Nueva Zelanda los globos también están equipados con ADS-B. Se debe mantener una separación de 10 millas náuticas entre los HAPS y las aeronaves siempre que el transpondedor esté en servicio. En las demás condiciones, se deberá mantener una separación de 20 millas náuticas. Se permite operar a 5000 pies por encima del globo.

En Canadá, el globo debe estar equipado con un transpondedor ADS-B en modo A/C certificado por aviación. Una vez lanzado los globos que operan con el modo C ya no se puede cambiar su código. Se usará GPS para identificar la ubicación del globo. El espacio libre de la aeronave también debe estar a 5000 pies por encima y por debajo de los HAPS.

Las organizaciones y empresas involucradas en aspectos aeronáuticos legales mantener la documentación legal oficial relacionada con el registro de las UAV, para dar más confianza a las autoridades civiles. También, la privacidad, protección de datos y la ciberseguridad también son aspectos de preocupación legal que deben tenerse en cuenta.

3. ESCENARIOS DE DESPLIEGUE

Los servicios de telecomunicaciones, como voz, datos y video, son proporcionados por sistemas y redes basados en sistemas de cable e inalámbricos. En las comunicaciones por radio, los parámetros más importantes a considerar en el diseño de redes y sistemas basados en HAPs son:

- Banda de frecuencias usada en el sistema HAPs
- Tipo de plataforma (LTA o HTA)
- Radio de servicio de la plataforma
- Altura mínima de la plataforma
- Altura máxima de la plataforma
- Máximo radio de vuelo de la plataforma
- Numero de haces de puertas de enlace
- Numero de haces de CPE
- Densidad de CPE
- Tipo de aplicación

Todos estos parámetros se tendrán de considerar en el despliegue de los distintos escenarios en los grupos de estudio del ITU-R.

3.1 Escenarios presentes

3.1.1 Enlaces de usuario de HAPs

La ITU-R preveía los escenarios para proporcionar servicios de telecomunicaciones basados en el despliegue de HAPs desde el 1997 hasta el día de hoy. Estos escenarios se basaron en grandes plataformas de LTA que sirvieron para implementaciones de terminales ubicuas. Las estaciones terrestres fijas se clasifican dentro de tres zonas de cobertura: urbana, suburbana y rural. Esta estación base puede comunicarse directamente con la carga útil en la plataforma del HAPs. Entendemos los HAPs de equipo local cliente como un equipo para enlaces fijos con la tierra que comunican con los HAPs y redistribuyen la conectividad a los usuarios finales mediante otros medios (tanto de manera cableada como inalámbrica). La señal transferida desde una estación terrestre hasta un HAPs se transfiere a la payload de los HAPs, allí, los switches determinarán donde enrutar la señal, tanto a los usuarios finales como a puertas de enlace.

Los HAPs deben operar en una ubicación fija en la estratosfera. Las antenas deben formar un haz desde el HAPs para ofrecer servicio a las estaciones

terrestres. Estas antenas fueron diseñadas para aumentar más la directividad, selectividad y efectividad de las puertas de enlace y poder combatir contra los desplazamientos que pueden sufrir las plataformas. Se propondrán redes HAPs con gran cantidad de haces y un factor de reutilización de frecuencia elevado, tendrán más de 700 haces con una reutilización de frecuencia de más de 100 veces. Estas redes se diseñaron con configuración de estrella, estableciendo la plataforma del HAPs como el principal núcleo. El sistema HAPs trabajará en la banda de frecuencia de 47.2-48.2 GHz con un ancho de banda de 100 MHz.

Cuando realizamos el diseño en estas bandas, la carga útil del HAPs está diseñada para tener gimbals para mantener el haz apuntando en la dirección correcta. También tendremos un conjunto de antenas con polarizador que nos aseguraran tener la polarización cruzada adecuada.

En términos de asignación de frecuencia, se identificó un segmento de espectro de 300 MHz en cada dirección para HAPs, en la banda de 28 GHz (downlink) y en la banda de 31 GHz (uplink). Específicamente, se consideró que los sistemas HAPs en estas bandas tenían las siguientes características:

- Se montarán los HAPs en aeronaves que se ubicarían en un punto fijo nominal a una altitud de 20 a 25 Km
- La aeronave estará equipada con una antena que proporcionará acceso a estaciones terrestres con un cierto ángulo de elevación mínimo.
- Cada haz formado va a corresponder a una celda en tierra, con un factor de reutilización de frecuencia de al menos 4 veces.
- Se desplegarían varias aeronaves para poder cubrir la totalidad del área demandada y las estaciones a bordo de ellas estarían conectadas mediante enlaces inalámbrico o ópticos.

La ITU examinó el uso de la banda de 6 GHz para enlaces de usuario HAPs. Para los enlaces de usuario en un sistema HAPs, la comunicación sería entre la plataforma y las estaciones fijas terrestres permitiendo una reutilización de frecuencia sustancial.

3.1.2 Enlaces gateway de HAPs

En los enlaces gateway, localizamos las frecuencias entre 6.44-6.52 GHz y 6.560-6.640 GHz, que permiten la comunicación entre la plataforma y las estaciones de tierra, ubicadas en el UAC, proporcionando interconexión con otras redes de telecomunicaciones terrestres. Las plataformas HAPs se

separarían aproximadamente 300 km a 1 000 km. Cada enlace gateway asociado serviría un único HAPs. Normalmente, no se solapará una el área de servicio de una estación gateway con la de otra estación gateway.

En la banda de los 6 GHz los HAPs se limitarán a enlaces de gateway, utilizando dos canales de 82 MHz cada uno. Dentro de este enlace de 80 MHz, un enlace de gateway funcionará de forma unidireccional y contendrá flujos de información, como el tráfico para aplicaciones de banda ancha. Se necesitará una velocidad mínima de 2,67 Gbit/s para soportar la carga de tráfico máxima en el sistema. Una plataforma HAPs usará un máximo de cinco enlaces gateway para soportar la carga de tráfico máxima que tendrá toda la plataforma. El número de enlaces de gateway dependerá de la cantidad de tráfico del usuario, el número de enlaces de gateway se podrán aumentar, hasta un máximo de cinco, según sea necesario.

3.2 Nuevos escenarios

Actualmente, las arquitecturas HAPs previstas pueden ser la solución a los siguientes casos:

Servicios de banda ancha de alta calidad a un grupo reducido de dentro de la huella:

- Servicio de acceso fijo a muchos terminales en la huella
- Uso de red troncal desde y hacia un número limitado de puntos de acceso a la red.

Los sistemas HAPs describen diferentes opciones de implementación. Múltiples haces pueden cubrir múltiples CPE en una celda, con multiplexación, por división en el tiempo o por división espacial. Los sistemas HAPs podrían tener la capacidad de generar dinámicamente haces puntuales y proporcionar cobertura de CPE bajo demanda. Esta solución consideraría las bandas de 21 GHz, 24-27 GHz y 38-39.5 GHz para enlaces de usuario y gateways con distintos anchos de banda en cada dirección.

Los sistemas HAPs previstos funcionarían generalmente con energía solar, lo que limita la energía total disponible para los diferentes servicios. El tamaño y el peso de las plataformas son restrictivos ya que las plataformas tienen que estar en el aire durante largos periodos de tiempo.

En las últimas dos décadas se ha producido una gran evolución en las cinco principales áreas técnicas, haciendo viable la banda ancha actual entregada desde los HAPs. La investigación global y los avances en plataformas aéreas, las baterías, la evolución de los materiales usados, que ahora son más ligeros, la tecnología solar y la eficiencia espectral permitirán el despliegue de una nueva generación de HAPs.

Los avances pueden permitir a los HAPs alimentados con energía solar puedan proporcionar servicio de banda ancha rentable y de velocidad aceptable a mercados todavía en progreso de desarrollo. Con estas plataformas se puede proporcionar un servicio de banda ancha de alta capacidad en zonas rurales y desatendidas y, también, se puede hacer un despliegue rápido para el socorro en caso de desastre.

4. ASPECTOS TÉCNICOS

4.1 Antenas

Las antenas forman un elemento esencial para una red de HAPs ya que afectan directamente a su rendimiento y a las características de este sistema.

4.1.1 Requerimientos para los HAPs

Un requisito general para que las antenas del HAP entreguen comunicaciones de banda ancha es que deben ser altamente direccionales, debido a las grandes distancias desde el HAP hasta el usuario final, por lo que necesitan una alta ganancia para entregar alta velocidad de datos. Si se van a desplegar servicios de telefonía móvil, se requiere delimitar la huella de cada antena para así minimizar las posibles interferencias.

Se considerará el uso de varios haces para las antenas según el servicio que van a ofrecer, por ejemplo, para la transmisión de TV HD se bajará la ganancia y la directividad para maximizar la cobertura. Otro caso, se considerará el uso de antenas orientables de alta ganancia en caso de desastre natural para comunicaciones de emergencia, así pudiendo atender a usuarios móviles de alta velocidad.

Las antenas en el HAPs deben ser orientables para poder acomodar el movimiento y el desplazamiento de la plataforma. Para los servicios de “millimeter waveband” se necesitará proyectar una gran cantidad de haces puntuales para proporcionar patrones de reutilización de frecuencias. Además, deben ser fácilmente configurables para responder a los servicios cambiantes de la celda.

En los últimos años se han realizado estudios para desarrollar antenas que puedan cumplir las características de los HAPs a un coste asequible. Se han presentado dos tipos de antena para compensar el movimiento que puede sufrir la plataforma del HAPs. La primera se trata de la antena multi-beam horn MBH con acondicionamiento mecánico que trabaja a 48 GHz, este contiene un mecanismo de control que servirá para compensar el movimiento de la plataforma. La otra antena se trata de una digital beamforming DBF de tipo escaneo electrónico que operará a 31 GHz, este formará un haz adaptativo con procesamiento de señal digital para compensar las fluctuaciones de la plataforma. Como vemos las antenas orientables son la solución más rentable

para los terminales terrestres, pero son difíciles de diseñar en el rango de frecuencias que actualmente tienen asignados, ya que se necesitaría una gran cantidad de elementos activos para conseguir una mayor ganancia en la apertura.

Se debe considerar para el seguimiento de los HAPs es si la formación digital del haz es mejor que las antenas mecánicamente conectada usando gimbals. La velocidad mínima que debe mantener el gimbal es de 10° por segundo, la velocidad máxima es de 20° por segundo, más lenta que la de la formación de haces digitales, que responden más rápidamente en los cambios que puede sufrir la plataforma debido a vientos, turbulencias, ... A medida que avanza la tecnología en las antenas permiten que se desarrollen conjuntos más asequibles y menos complejos para usar en los HAPs.

4.1.2 Tipos de antena usadas

Se presentaron los nuevos desarrollos de las antenas, como las comentadas anteriormente, como las phase-array combinadas con una dirección mecánica o electrónica. Su principal desventaja es la necesidad de la gran cantidad de elementos activos que se necesitan para conseguir una apertura de alta ganancia. Otra desventaja es la aparición de pequeños lóbulos que crean interferencia cuando trabajan a 28 GHz.

También se usará una antena de lente hemisférica para trabajar a 28 GHz, la cual tiene la misma apertura efectiva con un tamaño reducido de la antena. Esta lente hemisférica se usará en los HAPs como antena para el escaneo de vehículos móviles. Este tipo de antena puede formar múltiples haces en una amplia gama de ángulos sin estos incidir en las pérdidas de exploración, permitiendo así una mayor capacidad de seguimiento. En la actualidad este tipo de antenas pueden conseguir una ganancia de 35 dBi y una eficiencia del 68%.

Otra antena usada en los HAPs es la strip-slot-foam-inverted patch (SSFIP), un conjunto no separado uniformemente que trabaja en la banda Ka, banda comprimida entre 26.5-40 GHz. El uso de este tipo de matrices separadas de manera no uniforme garantiza una reducción en los niveles de lóbulo lateral, siempre que la separación sea por debajo de su longitud de onda.

Se utilizaron combinaciones de varios tipos de antena para producir antenas más eficientes y directivas, usando una lente de polarización circular que operará a

30GHz para poder proporcionar cobertura al suelo. Esta antena consiste en una lente dieléctrica alimentada por guías de onda circulares que acaban en bocina, integrando un polarizador en la guía de ondas para conseguir una polarización circular. Esta antena está formada por siete radiadores elementales e idénticos, capaces de manejar potencias elevadas en un ancho de banda considerable. Dadas sus características, estas antenas pueden ser las candidatas para el sistema de alimentación en una plataforma HAPs, la principal desventaja es que la lente puede degradar la calidad de la polarización circular, especialmente cuando se aleja de la broadside direction.

Para los terminales de tierra, se presentó un tipo de antena de lente para trabajar en la banda Ka, compuesta por una antena dieléctrica que se inclina y gira frente a la alimentación para dirigir el haz. El sistema de alimentación de banda ancha está hecho de quad-ridged horn con apertura inclinada y una coaxial-to-quad-ridged circular waveguide transition. La lente permitirá una dirección de haz mecánico simple de 0° a 65° en relación con el cenit y 360° en acimut girando tanto la lente como la apertura inclinada de alimentación. Se obtendrán ganancias de 22 dBi y una pérdida de exploración de 3 dB a 20 GHz, y una ganancia de 24 dBi con pérdida de exploración de 4,5 dB a la banda de 30 GHz.

Las matrices de antenas adaptativas también son una buena solución para HAPs. Se han informado técnicas para mejorar el rendimiento del conjunto de antenas, la capacidad de las comunicaciones celulares estratosféricas mejora al optimizar la amplitud de alimentación del conjunto de anillos concéntrico (CRA). Se configura la base con una función de coseno elevado para controlar el patrón de haz utilizado en la cobertura celular, esta función reduce los niveles de lóbulo lateral y aumentan la CIR dentro de las células.

En terminales móviles de tierra, se propone un concepto de antena de dirección de haz mecánico destinado a operar en la banda Ka para la prestación de servicios de banda ancha. La idea tener una antena de tamaño reducido con una alta ganancia y escaneo del haz. La dirección del haz en ángulo de elevación se logra mediante el movimiento de una lente plana frente la alimentación primaria y estacionaria, mientras que la cobertura de azimut completa se obtiene con una rotación de 360° de la lente. Se agrega una segunda lente plana en la parte superior de la alimentación para crear un foco virtual ubicado por debajo del centro de la fase de alimentación, haciendo reducir el F/D efectivo del sistema de enfoque sin distorsionar el haz. Se presentó un prototipo para la banda KA en el uplink, que trabaja con polarización circular, con una ganancia máxima de 27.3 dBi y unas pérdidas de exploración de 2.8 dB.

4.1.3 Recomendaciones a seguir

El UIT-R ha emitido recomendaciones para el uso de antenas para HAPs en las bandas 6 440-6 520 MHz, 6 560-6 640 MHz, 21.4 22.0 GHz, 24.25-27.5 GHz, 27.9-28.2 GHz, 31.0-31.3 GHz, 38.0 39.5 GHz, 47.2-47.5 GHz y 47.9-48.2 GHz para comunicaciones de banda ancha. Los sistemas HAPs podrían tener la capacidad de generar haces puntuales dinámicamente y proporcionar cobertura de CPE a demanda, por lo tanto, según esta recomendación, podrían adoptarse tecnologías de antenas de antenas adaptativas (AAA) o antenas de antenas escaneadas electrónicamente (AESA). Las AESA proporciona información directa y formación continua de haces. Los haces en el transmisor y en el receptor se pueden controlar individualmente y pueden trabajar a las mismas frecuencias. Los elementos del panel proporcionan una ganancia de 6 dBi cada uno, para obtener más ganancia se tiene que ajustar el número de elementos. A continuación, mostramos posible sistema de HAPs AESA, que está compuesto de un panel inclinado con cuatro caras y cuatro haces por cara. Cada cara consta de varias submatrices haciendo posible que los haces puedan barrer dinámicamente sobre la región prevista de cobertura.

La antena que forma el haz se basa de un conjunto de antenas y consta de varios elementos radiantes idénticos con una distancia fija. Todos los elementos deben tener patrones de radiación idénticos. Los ángulos de elevación y azimut se definen en función del sistema de coordenadas. El sistema controlará activamente todas las señales individuales que se envían a elementos de antena en el conjunto de antenas para dar forma y dirigir el patrón de radiación compuesta de la antena, formando un haz estrecho correlacionado hacia el usuario deseado. La señal no deseada no tendrá correlación desde la antena y tendrá un patrón de emisión diferente.

4.1.4 Materiales usados

Un método para desarrollar antenas compactas espaciales con un tamaño reducido que cumpla con los requisitos de rendimiento es el uso de metamateriales. Estos materiales son compuestos artificiales diseñados para tener un índice de reflexión negativo.

Un ejemplo se presentó en Malasia, en el año 2010, trataba de una antena circular (CMSA) para operar en una de las bandas con licencia HAPs para Malasia. Esta antena estaba compuesta de tres capas, con una capa de cobre en la tercera capa con laminado de microondas, permitividad relativa de 2.2 y variando la altura del espacio intermedio del espacio del aire. A la vez, este cobre

se alimentará eléctrica y magnéticamente a través de una lámina de cobre circular más pequeña entre la tercera capa y la primera capa. El uso del laminado de microondas de menor valor dieléctrico y su grosor más grande ha logrado más de 2.0 GHz de ancho de banda ($VSWR < 2$). Además de la forma circular, se colocan un total de una a cuatro estructuras circulares de anillo dividido por cobre circular, incluido todos los elementos parásitos son resonadores circulares complementarias de anillo dividido.

4.2 Modelo de canal

Uno de los principales objetivos para diseñar un sistema de comunicación es garantizar una calidad del servicio específica, que va a depender de los requisitos del usuario. Uno de los puntos clave para este diseño es la calidad del canal que está presente en el enlace. Este canal varía con el tiempo, se puede realizar una aproximación de las pérdidas que experimentará la señal, será necesario conocer todos los factores que influyen en la atenuación de la señal. Los mecanismos de propagación que afectan al enlace entre los HAPs y las estaciones terrestres o el usuario producen diversos efectos en la señal que varían según la frecuencia de funcionamiento. Es importante resaltar las diferencias considerables en los modelos que operan en bandas de baja frecuencia en relación con los que operan en las bandas superiores, así como informar sobre los desarrollos de modelos de canales más nuevos.

4.2.1 Aspectos de radiopropagación en enlaces HAPs

La señal que viaja entre un HAPs y un usuario sufre varios mecanismos de propagación causados por interacciones con los objetos circundantes. Se considera un enlace predominante de línea de visión (LOS) que se caracteriza por una distribución de Rice, pero las obstrucciones cerca del usuario móvil generan efectos de multipath que requieren que se emplee una distribución Rayleigh. Reflexión, dispersión y refracción están presentes en el suelo cerca del móvil, mientras que los efectos atmosféricos están presentes en el enlace entre el HAPs y el usuario. Los enfoques tradicionales que se han utilizado en los sistemas de comunicación por satélite también se aplicarán a los HAPs.

4.2.2 Efectos atmosféricos

Se deben considerar tres clases de efectos atmosféricos para sistemas basados en HAPS, como sigue:

- Efectos de aire limpio (Free-space loss): depende del ángulo de elevación y puede aumentar a ángulos de elevación bajos. Absorción debido a gases atmosféricos: relevante en ángulos de elevación bajos debido a la gran trayectoria inclinada a través de la atmósfera; pérdida de dispersión del haz debido a la flexión del rayo: causada por la disminución del índice de refracción de la atmósfera con el aumento de la altitud
- Efectos de hidrómetro: Absorción debido a la lluvia, nubes de agua, niebla, nieve o granizo, lo cual es especialmente importante en las frecuencias HAPs. Para las frecuencias asignadas a HAPs en la banda KA para la banda ancha, la absorción debida a los gases atmosféricos contribuye significativamente a la atenuación del enlace del HAPs.
- Efectos del medio ambiente: Atenuación y shadowing por el entorno local, como árboles, edificios, montañas..., Propagación multipath debido a los reflejos de la señal de radio con los obstáculos en el entorno local cerca de la antena receptora de tierra; los propios movimientos de la plataforma HAPs que provoca el desplazamiento de frecuencia Doppler y la elevación varía entre el terminal y la plataforma.

En EURASIP, se realizó un estudio de los efectos de propagación de gases y lluvia a 48 GHz, donde se comparó un sistema terrestre de punto a multipunto con probabilidad de lluvia. Se usó una medición de la atenuación del gas y una base de sats de radar de lluvia. Se uso un resonador Fabry-Perot para realizar las mediciones de la atenuación de gas. Los resultados muestran que cuando se utiliza una diversidad de rutas, se puede observar una mejoría en el rendimiento cuando llueve en la red HAP que en el caso del sistema terrestre punto a multipunto.

Un informe reciente del ITU-R, analiza varios desafíos y características de las diferentes bandas de frecuencia asignadas. En particular, la banda de 47/48 GHz ha demostrado ser un desafío para el despliegue de HAPs, especialmente debido al desvanecimiento de la lluvia en muchos países. La CMR-2000 reconoció que el espectro en la banda de 47/48 GHz identificada para HAPS es susceptible al desvanecimiento por lluvia, particularmente en la región ecuatorial, haciendo identificaciones adicionales en las bandas de espectro más bajo. El impacto del desvanecimiento por lluvia en las bandas de frecuencias más altas tiene implicaciones significativas en el diseño de la plataforma HAPS. Un desvanecimiento por lluvia de 10 dB requiere un aumento de 10 veces en la potencia radiada para compensar. Un desvanecimiento por lluvia de 20 dB requerirá un aumento de 100 veces en la potencia radiada para compensar. En

zonas tropicales, la lluvia se desvanece en esta banda puede acercarse a los 90 dB.

4.2.3 Aproximaciones del modelo.

Dado a que diversos factores pueden influir en las características de propagación en el enlace de los HAPs, se utilizará el modelo de canal como herramienta de diseño, donde su principal objetivo es caracterizar con precisión los fenómenos de la propagación que afectan la recepción de la señal, así permitiendo una mejor evaluación de los sistemas de comunicación antes de su implementación. Para los sistemas basados en HAPs, las características geométricas que definen el sistema en sí son muy relevantes.

El modelo de canal ha sido estudiado durante mucho tiempo, especialmente en el campo de las comunicaciones satélites, concretamente en los sistemas de banda estrecha. Una práctica común es dividir los modelos de canales en dos categorías: banda estrecha y banda ancha. Para los modelos de banda estrecha, algunos de ellos se han caracterizado estadísticamente utilizando distribuciones de Rice o Rayleigh. La distribución de Rice se utiliza en situaciones en las que hay una ruta de señal fuerte, generalmente en escenarios LOS. Por otro lado, la distribución de Rayleigh debe emplearse para entornos de múltiples rutas. El shadowing generalmente se modela utilizando una distribución lognormal, que es aplicable para casos en los que, por ejemplo, los edificios obstruyen la señal del HAPS al usuario.

4.2.4 Estudio de la penetración en los edificios

La posibilidad de usar HAPs para proporcionar cobertura dentro de los edificios ha sido objeto de estudio durante varios años. Con un ángulo de elevación elevado, los efectos del shadowing pueden considerarse insignificantes, pero para los ángulos de elevación más bajos se deben tener consideraciones adicionales, como el sombreado y la difracción.

Aunque algunas características operativas entre satélites y HAPs son similares, las diferencias en la estabilidad de la plataforma, el mantenimiento de la estación y la velocidad deben considerarse para la pérdida de penetración. Una característica que es muy relevante para HAPs es el ángulo de elevación y, por lo tanto, debe investigarse la dependencia de la pérdida de penetración en el ángulo de elevación.

4.3 Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)

MIMO es una tecnología que emplea múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor para aumentar la capacidad y la eficiencia espectral, también para mejorar la fiabilidad, basada en la explotación de técnicas de procesamiento de espacio-tiempo sin requisitos adicionales de potencia o ancho de banda en entornos de dispersión. La aplicación de antenas MIMO compactas a los sistemas HAPs tiene como objetivo lograr ganancias de diversidad y multiplexación espacial, así como eliminar el problema de sincronización y la mitigación dentro de los HAPs y otras infraestructuras en un enlace de comunicación.

Debido a condiciones predominantemente LOS, dispersión limitada a frecuencias de onda milimétrica y espacio reducido a bordo de la plataforma, el enfoque clásico MIMO no se considera una alternativa viable para HAPs.

4.4 Fuentes de energía

Como los UAV de larga duración, los HAPs funcionan con energía solar y toman la energía del Sol durante el día. El exceso de energía se usa para llenar las baterías recargables o se pasa a las celdas de combustible para el almacenamiento de energía, que se va a usar por la noche como sustituto de las celdas solares para mantener la altitud y ubicación de la plataforma para que pueda funcionar correctamente. Se está investigando el uso de aeronaves con energía solar.

El componente principal del sistema de energía es el módulo fotovoltaico. Para adaptarlos, existen algunas compensaciones entre el costo, la eficiencia de las diferentes tecnologías de celdas y la envergadura de ala necesaria (en el caso de aeronaves de ala fija) o el área de superficie del globo para asignar los módulos fotovoltaicos necesarios.

Hace algunas décadas, el uso de células solares se consideraba la única alternativa viable para alimentar los UAV. Una celda de combustible es una celda electroquímica con dos electrodos, que permite que los iones de hidrógeno cargados positivamente se muevan de un electrodo a otro. Para funcionar,

necesita hidrógeno y oxígeno. El oxígeno se toma del aire, mientras que el hidrógeno se extrae por electrólisis durante el día de la humedad del aire y se almacena en tanques de almacenamiento para ser utilizado como fuente de energía en la noche. El exceso de energía de las células solares se utiliza para realizar la electrólisis. Por lo general, las celdas de combustible funcionan en combinación con baterías como parte de un subsistema de energía.

Se están investigando distintos métodos para hacer más eficiente el almacenamiento de energía. Las mejoras tecnológicas en las baterías a base de litio, como el uso de diferentes materiales catódicos y especialmente las baterías a base de fosfato, permiten un uso más eficiente de las baterías a bordo de HAPs. Además, la “Redox Flow Battery”, una tecnología que se encuentra actualmente en investigación, es una alternativa prometedora para HAPs, ya que puede reaccionar rápidamente a los cambios en la carga, así como para manejar aplicaciones intensivas en energía.

4.5 Enlaces ópticos

Una de las tecnologías que se ha investigado y propuesto para interconectar HAPs es el uso de láser. Las comunicaciones basadas en láser logran varias ventajas sobre los enlaces convencionales basados en RF. Por ejemplo, los láseres tienen el potencial de transferir datos a velocidades de datos extremadamente altas. La divergencia de haz estrecho permite un funcionamiento seguro y sin interferencias. Esto da como resultado una reducción del consumo de masa y energía para el enlace de comunicaciones, en comparación con los transceptores de RF más grandes y pesados.

Se han sugerido enlaces ópticos en espacio libre para interconectar HAPs con HAPs y HAPs con satélites. Se han identificado las principales diferencias con el uso de enlaces ópticos en espacio libre en redes HAPs:

- Los enlaces punto a punto frecuencia óptica son posibles entre HAPs, estaciones terrestres y satélites.
- Mejora con el uso de enlaces ópticos como pueden ser la minimización de la FSL, menor consumo de energía, menor masa y tamaño y no tienen restricciones en la regulación.
- El principal problema es en el LOS, donde las nubes y turbulencias pueden afectar al rendimiento del enlace óptico.
- Puede alcanzar una velocidad de transmisión de datos del orden de Gb/s.

Las comunicaciones ópticas en HAPs se utilizan tanto para vincular HAPs con satélites como para configurar plataformas entre HAPs, pero se han investigado otras arquitecturas utilizando comunicaciones ópticas, por ejemplo, comunicaciones ópticas de espacio libre de transmisión de dos rayos totalmente óptica para redes de banda ancha basadas en HAPs. Esta arquitectura conecta la estación base del transceptor a la red central a través del HAPs, lo que proporciona una solución de retroceso rápidamente desplegable para casos de desastre y para atender a los usuarios tanto en entornos urbanos como en áreas rurales.

Los enlaces ópticos están bloqueados principalmente por nubes, y esta es una de las razones por las que se prefiere desplegarlos sobre la atmósfera, para interconectar HAPs y / o satélites. En el proyecto CAPANINA se demostró la idoneidad de la óptica para enlaces de banda ancha (1 a 100 Gbps), cubriendo distancias que van desde 400 m (a 16 km de altitud) hasta 800 m (a 25 km de altitud), cuando la visibilidad era de 100 %.

4.6 HAPs versus Satélites

En los sistemas de comunicaciones de transmisión de datos de alta velocidad, y en especial para el desarrollo de aplicaciones de radiodifusión interactiva, es necesario contar con redes cuya latencia sea muy baja. Esta latencia tiene relación directa con el retardo de propagación. Comparando la latencia entre los HAPs y los satélites se puede observar una reducción significativa de la latencia, lo que hace que sean más propicio para este tipo de comunicaciones.

En referencia al proporcionar servicio, para lograr un servicio con un sistema de satélites LEO permanente es necesario contar con una red de satélites que vaya permutando durante cada tiempo de paso del satélite. Para el caso de los HAPs, con solo una plataforma HAPs se logra proporcionar servicio las 24 horas continuamente en su zona de cobertura.

Otra ventaja la podemos encontrar en el tiempo útil, los satélites pueden tener una vida útil de unos 6 años y no son recuperables, los HAPs si son recuperables.

En la siguiente tabla podemos apreciar la comparativa de las características principales que constituyen un sistema de comunicación, tanto en HAPs como en satélites:

	Terrestre	HAPs	Satélite LEO	Satélite GEO
Cobertura de la estación	< 1 Km	Hasta 200 Km	>500 Km	Global
Tamaño celda	0.1-1 Km	1-10 Km	50 km	400 km
Área servicio total	Servicio puntual	Nacional/regional	global	Global
Máxima velocidad de transmisión por usuario	155 Mbit/s	25-155 Mbit/s	< 2 Mbit/s uplink 64 Mbit/s downlink	155 Mbit/s
Despliegue del sistema	Estaciones base antes de su uso	flexible	Varios satélites antes de usarlo	flexible
Coste estimado	variable	Aproximadamente 50 millones	9.000 millones	>200 millones

Tabla 4.1: Comparación entre HAPs, satélites y sistemas terrestres

5. APLICACIONES HAPS

5.1 Aplicaciones de banda ancha

El internet de banda ancha es un componente crucial de la economía digital, donde todos los que no tienen comunicaciones de banda ancha están en una gran desventaja. Una buena parte de las personas que no disponen de conexión de banda ancha se encuentran en países en desarrollo o en áreas remotas o rurales en países avanzados, donde el despliegue de infraestructura para las comunicaciones convencionales no es posible o demasiado costoso. La conectividad de banda ancha es el objetivo principal de utilizar HAPs en el contexto de los servicios fijos definidos por la ITU y ya se adoptó una resolución en 2015. El objetivo de la conectividad de banda ancha mediante HAPs es proporcionar acceso a internet a usuarios ubicados en estas áreas a mediano y largo plazo. Puede ser acceso directo al hogar, o puede ser un enlace a un punto de acceso. Dada la reciente innovación en antenas y otras tecnologías, la capacidad de banda ancha de varios gigabits podría lograrse utilizando HAPs, donde la conectividad directa a los usuarios finales y el servicio se proporciona a los usuarios finales directamente a través de HAPs.

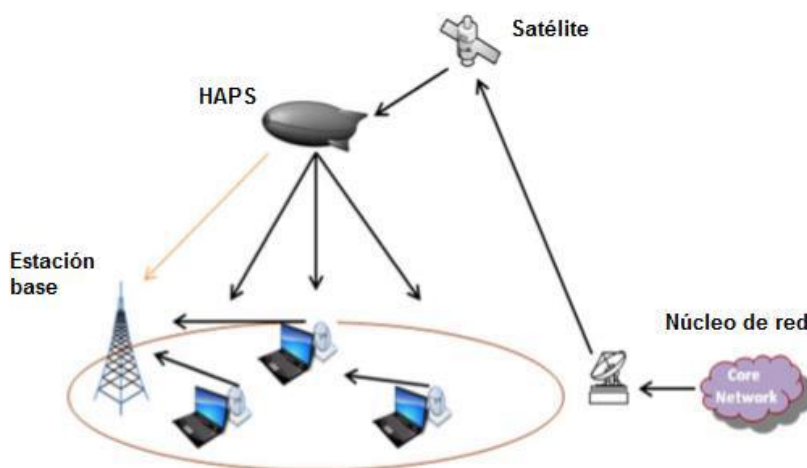


Fig.5.1: Esquema de integración de redes terrestres, satélites y HAPS para proporcionar conectividad global

En el caso de una red, pueden conectarse varios HAPs entre sí mediante enlaces ópticos que pueden transportar velocidades de la orden de Gbps. Una red HAPs puede ser densa (toda el área de la red está cubierta) o dispersa, con HAPs ubicado solo sobre el área de interés. Dos HAPs que se comunican entre ellos pueden estar separados unos 700 Km. Un proveedor que utiliza HAPs

puede diseñar su red para optimizar la capacidad o la cobertura. Por ejemplo, se puede desplegar una flota de HAPs para cubrir eficientemente un área amplia o para proporcionar más capacidad a un área de densidad de población de tamaño mediano.

Las antenas reflectoras planas, conocidas como antenas reflect array, combinan características de los reflectores parabólicos y las agrupaciones de antenas, constituyendo una alternativa interesante para comunicaciones a larga distancia en las que se obtiene una ganancia alta. Aparte de tener un proceso de fabricación sencillo y de coste reducido, son ligeras de peso y fáciles de desplegar.

5.1.1 Arquitectura de red.

Las principales infraestructuras de telecomunicaciones que ofrecen servicios de banda ancha son redes terrestres y sistemas de comunicación por satélite. Se consideran los HAPs como una solución intermedia a las anteriores, con las que comparten ciertas características.

Existen distintos tipos de arquitecturas de red que pueden actuar los HAPs, operando tanto de forma independiente como integrados en sistemas terrestres, por satélite o en constelaciones de múltiples HAPs. Una configuración de red basada en HAPs operando de manera independiente, permitiría proporcionar acceso inalámbrico a los usuarios de manera similar a como lo haría una estación base terrestre.

Para incrementar la capacidad y el área de cobertura, pueden emplearse sistemas de múltiples HAPs conectados a través de una estación base terrestre o mediante enlaces directos entre ellos. Este último escenario presenta una complejidad mayor, pero a cambio ofrece una mayor flexibilidad en la gestión y configuración de la red.

Con la implementación de los HAPs en las redes pueden tener un papel importante en el desarrollo de los sistemas móviles 4G y 5G. Se deberá tener en cuenta varios aspectos, como las interferencias entre HAPs y estación base, incremento de la capacidad de red, rendimiento, metodología de asignación de recursos...

La integración de los HAPs, las redes terrestres y los satélites en un sistema heterogéneo sería la alternativa más interesante para proporcionar la conectividad global y servicios de banda ancha. La integración de los tres sistemas juntos en una misma red permitiría aprovechar los puntos fuertes de cada sistema, pero se tendrían que tener en cuenta varios aspectos, como la disponibilidad de espectro, interferencias entre sistemas, protocolos de acceso, calidad del servicio...

El tipo de antena para los HAPs depende de la aplicación que van a tener y de la banda a la cual operen. Para servicios de radiodifusión se usarán antenas con ganancia baja que generen haces poco directivos para cubrir una amplia zona de terreno. Para servicios de cobertura celular se prefiere antenas con ganancia alta que generen una gran cantidad de haces estrechos. Estas antenas deben de ser de tamaño pequeño y poco pesadas, que funcionen con poca potencia y tengan una alta eficiencia de radiación, también se trata de conseguir un bajo nivel en los lóbulos secundarios.

5.1.2 HAPs de banda ancha para aplicaciones específicas

Algunas aplicaciones específicas de HAPs de banda ancha para comunicaciones se describen brevemente en esta sección.

- **Banda ancha en zonas rurales:** La flexibilidad y la capacidad de proporcionar conectividad fiable sin la necesidad de construir una infraestructura terrestre extensa hacen que los HAPs sean una herramienta para reforzar las redes terrestres y garantizar que las comunicaciones móviles se puedan entregar fuera de las áreas urbanas. Cada HAPs puede dar servicio a un área de 100 Km de diámetro, la cual puede aumentarse interconectando varios HAPs entre ellos, así se podrá proporcionar cobertura de banda ancha a áreas grandes y escasamente pobladas.
 - **Servicio de socorro en caso de desastre:** Los HAPs pueden permitir enlaces entre los servicios de emergencia en el sitio del desastre y mantener una conexión de banda ancha en el área, donde se va a necesitar comunicación para la coordinación y concienciar a la población y a las organizaciones de la situación en la que se encuentran. Estos desastres suelen sobrecargar las redes tradicionales y la infraestructura terrestre es vulnerable a los hechos. Esto puede evitar una interconexión del gateway a una red central internacional, donde los enlaces HAPS a satélite serían una alternativa muy considerable. Un ejemplo podría ser el uso de HAPs para misiones de detección, control y extinción de incendios

para garantizar la comunicación. En estos casos los HAPs podrán admitir cargas útiles adicionales en la misma plataforma o en una plataforma soporte, como podrían ser sensores, cámaras térmicas, ... para respaldar el conocimiento de la situación.

- **Comunicaciones en eventos temporales:** Los eventos deportivos, musicales o políticos masivos pueden crear una alta demanda de capacidad de red por un período de tiempo limitado. Los HAPs puede proporcionar esta infraestructura sin los altos costos iniciales o la posible redundancia después del evento. Gracias a su despliegue flexible y rápido, los HAPs pueden proporcionar una solución a estos picos excepcionales de tráfico sin requerir una gran inversión.

5.1.3 3D

En la última década ha aumentado de forma notable el número de vehículos aéreos no tripulados, más conocidos como drones. Este uso masivo de drones tendrá un impacto considerable en las redes inalámbricas. Se considerarán dos roles de los drones, estaciones base de área y equipos de usuario. Debido a su gran movilidad para tener la mejor LOS posible, los drones de estación base pueden proporcionar servicio de banda ancha a gran escala, tanto en desastres como en grandes eventos temporales gracias a su gran capacidad de implementación flexible y rápida. Los drones de equipo de usuario se tendrían que conectar a una red de usuario para funcionar, su gran característica es su capacidad para moverse en todas direcciones, 3D, optimizando sus trayectorias para completar sus servicios rápidamente. Los servicios que pueden ofrecer este tipo de drones sería entrega de paquetería, teledetección, vigilancia...

Para admitir drones en aplicaciones de red inalámbricas existe la necesidad de desarrollar una red celular 3D formada por drones estaciones base y drones de equipo de usuario. En la actualidad, existen diferentes inconvenientes para los drones en las redes inalámbricas, por ejemplo, los drones estación base de área su principal problema es su despliegue 3D, la planificación de la red, la asignación de frecuencias y la asociación a celdas 3D. Por lo que hace los drones de equipo de usuario, se necesita comunicaciones seguras y de baja latencia para poder conseguir un control. Las redes terrestres actuales están pensadas para admitir usuarios terrestres y no podrán atender fácilmente a usuarios aéreos, por lo tanto, el despliegue de una red de drones de estación base facilitaría al uso y despliegue de drones de equipo de usuario.

Se pueden constituir redes de drones estación base y de equipos de usuario con sistemas HAPs independientemente de los otros sistemas. En estas redes los drones estación base sirven a los drones usuario en el downlink mientras que los HAPs proporcionan servicios de red a los drones estación base. Los drones estación base ajustarán su posición según la posición de la plataforma HAPs.

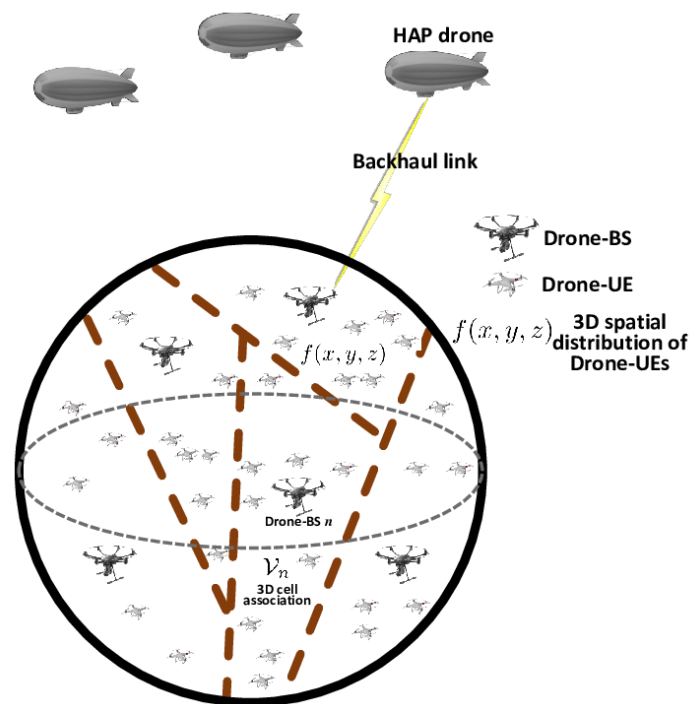


Fig.5.2: Ejemplo red 3-D

5.1.4 HAPs para comunicaciones 5G.

En los últimos años la necesidad de acceso inalámbrico de alta velocidad aumenta rápidamente debido al gran uso de dispositivos móviles e equipos de IoT. La capacidad de cobertura de las redes se ha visto muy afectada, haciendo buscar nuevas alternativas para su correcto funcionamiento. Estas nuevas alternativas incluyen las comunicaciones D2D, uso de celdas ultra densas y comunicaciones de onda milimétrica, se consideran el nexo de los sistemas celulares 5G. A pesar del gran número de beneficios estas alternativas tienen sus propias limitaciones. Las comunicaciones D2D necesitarán una mejor planificación de frecuencias y uso de recursos de las redes celulares. Las celdas ultra densas tendrán dificultades en backhaul, estructura de la red e interferencias. Las comunicaciones de onda milimétrica estarán limitadas por el

bloqueo y la dependencia de LOS para cumplir con la alta velocidad y baja latencia.

Las estaciones bases voladoras, tanto drones como HAPs se consideran un complemento inevitable para un entorno 5G, que superará algunas de las dificultades presentadas anteriormente. El uso de HAPs podría ser una solución de larga duración para la implementación de celdas ultra densas en zonas rurales.

El uso de UAV equipados con capacidades de onda milimétrica pueden establecer conexión natural para los usuarios de tierra que tengan una buena LOS. La combinación de UAV con ondas milimétricas y el uso de técnicas MIMO puede crear una red dinámica y voladora capaz de proporcionar servicios de alta capacidad.

Además, los UAV pueden ayudar a varias redes terrestres como D2D y redes vehiculares. Por ejemplo, debido a su movilidad y comunicaciones LOS, los drones pueden facilitar la rápida difusión de información entre dispositivos terrestres. Además, los drones pueden mejorar potencialmente la confiabilidad de los enlaces inalámbricos en las comunicaciones D2D. los drones voladores pueden ayudar a transmitir información común a dispositivos terrestres, reduciendo así la interferencia en las redes terrestres al disminuir el número de transmisiones entre dispositivos. Además, el uso de drones estación base pueden usar enlaces a otras drones conectados, así se puede aliviar la carga de la red terrestre.

5.2. HAPs como infraestructura complementaria para la observación de la Tierra y la teledetección

5.2.1 Introducción a observación de la Tierra y teledetección

Además de las mediciones terrestres, el mapeo móvil, las soluciones actuales para la observación de la Tierra y la teledetección se basan en los satélites de órbita terrestre baja y de órbita geoestacionaria y plataformas aéreas con sistemas de aeronaves tripulados a distancia (RPAS). Los HAPs tienen el potencial de cubrir la brecha entre los satélites y las aeronaves convencionales, tripulados o no, y no están limitados ni por la mecánica orbital ni por el consumo de combustible. Las principales ventajas en comparación con los satélites es que la distancia a los objetos a observar es más corta, lo que reduce la resolución

espacial y el consumo de energía de transmisión. Otra ventaja respecto los satélites de órbita baja terrestre es que los HAPs se benefician de su capacidad para monitorear de manera persistente en un área durante periodos prolongados, por lo que se mejora la resolución temporal.

Comparando con RPAS, las ventajas que tienen los HAPs es que son sistemas más resistentes y que una posición conocida. Alguno de los problemas en RPAS aparecen para establecer la localización exacta del objeto detectado respecto la posición relativa de la aeronave. Pero hay aplicaciones que no se pueden hacer en los HAPs, por ejemplo, la detección en las líneas eléctricas. Aunque en algunos aspectos los HAPs pueden aportar una mejoría en las aplicaciones actuales, en otras la implementación de los HAPs puede que no sea conveniente.

Los HAPs se pueden adoptar dos enfoques diferentes para la observación de la Tierra y la teledetección, según el tipo y el destino de los datos recopilados. La primera es el uso de los HAPs como sistemas de detección autónomos si los datos son concluyentes y se envían directamente a la estación terrestre. El otro trata de abordar las sinergias con los satélites de observación de la Tierra, como una capa más cercana al suelo y capaz de proporcionar una resolución espacial más alta o superior y trabajar con potencias de transmisión más bajas, pudiendo modificar la carga útil siempre que fuera necesario.

Ambos enfoques parecen prometedores en un futuro cercano. Su papel en las áreas de aplicación observación de la Tierra y teledetección es diverso. Desde los enfoques iniciales en los primeros proyectos HAPs, medición ambiental y control de tráfico, se ha informado de muchas nuevas aplicaciones, como podría ser en estudio de migración de animales, acciones militares y policiales, como control de fronteras y guardacostas, detección de incendios, ...

La instrumentación para la teledetección se basa en diferentes tecnologías, como el uso de cámaras ópticas, cámaras térmicas, radares de apertura sintética, escáneres láser y detección de luz y rango. Todas estas tecnologías se pueden implementar y usar en HAPs.

En observación de la Tierra y teledetección basado en cámaras montadas en HAPS evitamos algunos problemas con la geometría de la imagen, la variación en la franja debido a la geometría de visualización, ya que operan a altitudes más altas que los RPAS y aviones. También pueden recopilar más datos en un área más grande que los RPAS, ya que son capaces de conseguir un campo de visión de 10-50 Km con una resolución de 5-10 cm a 1 m. Como más grande sea el ángulo de observación fuera del nadir (más de 30°) disminuirá la resolución.

Al colocar un transmisor o receptor de radar dentro del HAPs se podrán realizar de manera más eficiente muchas de las funciones que actualmente realizan los satélites o aeronaves. También, al poder variar la carga del HAPs se puede configurar distintas formas de radares.

El BiSAR se basa en una configuración de receptor de dos canales, donde el transmisor y el receptor están en plataformas separadas. El transmisor puede ser un satélite LEO o GEO y el receptor, un HAPs, que tenga más de una antena en ubicaciones separadas. Un canal se usará para detectar señales de ruta directa provenientes del transmisor, y se podrán usar como señal de referencia para filtrar las incoherencias de tiempo con la señal reflejada desde el objeto detectado y para su sincronización.

El SAR monostático es una tecnología única con restricciones para ser usada en los HAPs, debido a que los HAPs se pueden considerar que operan estacionariamente. El SAR monoestático es más adecuado cuando se instala en satélites LEO, proporcionando anchos de barrido que oscilaran entre 5 y 500 Km con resoluciones mínimas de 5-15 m.

Los satélites GEO también se pueden considerar casi estacionarios, también ocurrirá lo mismo con ellos. Sin embargo, se ha comprobado el posible funcionamiento de las técnicas SAR monoestáticas en los satélites GEO para la observación de la Tierra y la teledetección con el radar de apertura sintética geosíncrona. La órbita geoestacionaria no perfecta de un satélite geosíncrono define la apertura sintética en la adquisición de GEOSAR, con baja excentricidad e inclinación del plano orbital. Esta pista elíptica de 50-100 km en los ejes semi principales es suficiente para definir una apertura sintética. Este es un escenario similar a los HAPs que se mueven en círculos: el radio define la resolución SAR.

Lidar, que opera entre los espectros de infrarrojo cercano y UV (típicamente entre 0.2 μm y 11 μm), tiene una longitud de onda significativamente menor que el radar, proporcionando así una resolución fina que permite la detección de partículas suspendidas y constituyentes atmosféricos que de otro modo no serían detectables por el radar. Esto incluye objetos no metálicos como aerosoles químicos y otros contaminantes, rocas, lluvia, hielo, ... Además, puede mapear terrenos a una resolución de centímetros. Las principales desventajas que tiene lidar es que es más costoso que el radar, más sensible al clima nublado y opera a menor altitud.

Existen diferentes tipos de Lidar, como la retrodispersión elástica, la absorción diferencial DIAL, Doppler, fluorescencia y Raman. La retrodispersión elástica se utiliza para detectar polvo, nubes, e indirectamente para la temperatura y la velocidad del viento. DIAL, fluorescencia y Raman se utilizan para medir la concentración de especies químicas, se usan para mediciones normalmente en rangos más cortos que decenas de kilómetros. Por encima de 80-100 km, estas técnicas muestran varios problemas debido a cambios en la composición atmosférica. Afortunadamente, en las altitudes HAPS, las observaciones Lidar no tienen dificultades especiales.

El Airbone Laser Scanner (ALS), a bordo de aeronaves o helicópteros permite un modelaje 3D del paisaje combinando el movimiento de vuelo con uno trasversal. Esta limitado por el láser Lidar al tomar mediciones, ya que requiere instrumentación para determinar la posición y orientación del sensor. En los HAPs también dependen del radio del círculo de vuelo del HAPs, en comparación con los satélites GEO.

Finalmente, un procedimiento de calibración de los instrumentos de detección a bordo del HAPs es obligatorio. La operación casi estacionaria de HAPs reducirá los problemas de calibración de los sensores remotos debido a la orientación angular y la velocidad de la plataforma en RPAS y aeronaves. En HAPs, una vez que se realiza una precalibración, no se necesita ninguna calibración adicional. Además, la asignación de los sensores debe determinarse cuidadosamente. Esto es más complicado en RPAS, helicópteros y aeronaves, porque el shadowing (montañas, edificios, vegetación, etc.) produce desvanecimiento en las señales GNSS, reduciendo así el porcentaje de tiempo de la disponibilidad de la señal GNSS. Las señales de operación adicionales enviadas desde la estación de control de tierra para sincronizar el hardware de adquisición pueden estar ocultas por obstáculos terrestres, un hecho aliviado por la visión directa entre el HAPs y la estación de control de tierra.

La posición de un sensor puede conocerse directamente desde la recepción GNSS, o no, dependiendo de su ubicación exacta y los obstáculos circundantes. En RS basado en aeronaves, este problema se resuelve mediante el uso de técnicas especiales, como localización y mapeo simultáneos. Estos algoritmos complejos no son necesarios en HAPs.

5.2.2 Ejemplos de aplicaciones de observación de Tierra y teledetección.

5.2.2.1 HAPs para el control del medio ambiente

La monitorización recurrente de grandes áreas forestales para poder detectar el principio de la deforestación, como la explotación forestal no autorizada, la tala selectiva de árboles y los cultivos y asentamientos ilegales, ... Con esta detección temprana se pueden evitar las deforestaciones a gran escala, daños medioambientales o actividades ilegales.

Otras de las aplicaciones que podemos proporcionar en los HAPs es la monitorización de la atmósfera, obteniendo información de la calidad del aire. También podemos usar los HAPs para control de posibles zonas de riesgo, como podría ser volcanes o procesos sísmicos.

5.2.2.2 HAPs para la seguridad y control de fronteras

Una de las aplicaciones que nos pueden ofrecer los HAPs es el control de cambios en superficies predefinidas como, por ejemplo, una plataforma petrolífera. Mediante la monitorización constante podemos conseguir la detección de varias alteraciones que puedan sufrir como, por ejemplo, cambios térmicos, control de fugas, ...

Otra aplicación que podemos conseguir con HAPs es el control del tráfico marítimo. La monitorización del tráfico marítimo, detectando que las embarcaciones sigan la ruta predefinida y no desconecten su sistema de seguimiento, la detección de crudo vertido al mar de las embarcaciones y acciones de pesca ilegal puede ser detectado mediante el uso de plataformas HAPs.

También se pueden usar los HAPs para el control en las fronteras con la monitorización continua de la frontera así pudiendo regular su paso y controlando que no se produzcan anomalías en ella.

5.2.2.3 HAPs para entorno urbano

En un entorno urbano los HAPs pueden tener varias aplicaciones aparte de proporcionar servicio de banda ancha. Una de las aplicaciones es el control de tráfico, tanto vehículos como masificaciones de personas, y buscador de aparcamiento. Todo esto lo podríamos conseguir con la monitorización continua y a tiempo casi real de la zona.

6. ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS HAPs

En este apartado vamos a muestras las ventajas que podemos tener usando redes HAPs en comparación a otros sistemas y los riesgos y oportunidades que debemos conocer a la hora de desplegar los sistemas HAPs.

6.1 Ventajas y características de HAPs

Las principales ventajas que podemos obtener con los HAPs son las siguientes:

Bajo coste: Un HAPs es más barato que un satélite, tanto en términos de coste de lanzamiento como de manejo, es más económico lanzar un HAPs que un satélite ya que se requieren componentes con especificaciones más relajadas, y configuración. Por lo que hace el sistema de redes HAPs también es más económico que una red terrestre.

Bajo coste de configuración y mantenimiento: Los HAPs pueden estar en órbita funcionando durante periodos de más de un año, pudiendo volver a tierra para volverlos a configurar.

Despliegue rápido y fácil: Un HAPs puede ser desplegado para su funcionamiento en cuestión de horas. Esta característica tiene mucho interés para los proveedores de servicio ya que los HAPs pueden ser un complemento para la red existente en momentos de sobrecarga, o para hacer un despliegue emergente en caso de desastre natural.

Gran área de cobertura: La distribución de los HAPs en su despliegue implica que las comunicaciones HAPs experimenten menos atenuaciones comparado con las redes terrestres.

Bajo retardo de propagación y menor potencia de operación: El retardo de propagación en una red HAPs es mucho más pequeño que en los satélites. También, como operan a menor distancia a la Tierra que los satélites vamos a necesitar una menor potencia de transmisión.

Flexibilidad para adaptarse a las distintas demanda de tráfico: Podemos adaptar los HAPs según la demanda que sea necesaria en el momento. No es necesario el despliegue de toda una gran red de HAPs al principio, podemos expandir la red gradualmente a medida que se necesite mayor capacidad.

Menos infraestructura en tierra: Un HAPs puede dar servicio a una gran cantidad de celdas.

Uso múltiple: Los HAPs no están limitados solo a dar servicio de comunicación, pueden ofrecer otras aplicaciones como observación de la tierra y teledetección.

Uso energía renovable: Los HAPs se alimentan de luz solar, evitando el uso de combustibles contaminantes.

6.2 Principales riesgos de los HAPs

La implementación de sistemas HAPs presentan conceptos e ideas las cuales pueden presentar algún problema o complicación a la hora de obtener su correcto funcionamiento.

Estabilidad y estacionariedad de la plataforma: La capacidad de un HAPs para mantenerse estable en su posición con las rachas de viento variable es uno de los puntos críticos para la viabilidad del sistema. Se usaran técnicas de diversidad y múltiples HAPs para combatir este desafío. Con las rachas de viento también se puede ver afectada la inclinación de la plataforma haciendo perder el ángulo de transmisión sobre la zona de cobertura.

Duración del servicio: Actualmente, los HAPs no están capacitados para realizar vuelos de larga duración. Se está estudiando la mejora de las baterías y del sistema de alimentación e intentando reducir el tamaño de la carga.

Propagación y diversidad: Los servicios en las plataformas HAPs se han localizado a las bandas de 47-48 GHz, las cuales sufren mucha atenuación con fenómenos atmosféricos, como la lluvia, que provocará una notable atenuación y será necesario aplicar técnicas de scattering.

Requerimientos del sistema: La implementación de los sistemas HAPs para servicios de banda ancha requieren pequeñas modificaciones del diseño básico existente para los servicios de tipo celular, basando su desarrollo en el plan de frecuencias y los patrones de rehusó. También vamos a tener que elegir una modulación y una codificación para optimizar la capacidad de la red usando técnicas adaptativas.

Localización de recursos y protocolos de red: Se deberán volver a desarrollar la asignación de canal y localización de recursos debido a que es distinta a cualquier escenario terrestre o satélite.

Efectos de handoff: En escenarios HAPs con más de una plataforma pueden aparecer efectos de handoff cuando las antenas emisoras se mueven a causa de los cambios de posición de las plataformas.

6.3 WRC-19 punto 1.14

Las innovaciones tecnológicas y la creciente urgencia de expandir la disponibilidad de banda ancha llevaron a una revisión del entorno regulatorio actual para plataformas de entrega como HAPs. Las plataformas que operan en la estratosfera están lo suficientemente elevadas como para proporcionar servicio de banda ancha a un área grande. Los recientes despliegues de prueba de estaciones que entregan banda ancha desde más de 20 km por encima del suelo han demostrado su potencial para proporcionar conectividad a comunidades desatendidas con una infraestructura mínima a nivel del suelo. La plataforma HAPs también es de particular interés para la gestión de desastres.

Se necesitan más opciones para la entrega de banda ancha, especialmente para países con infraestructuras menos desarrolladas. HAPs puede facilitar el despliegue de banda ancha al proporcionar una plataforma adicional que brinda un servicio que podría aumentar la capacidad de otros proveedores utilizando plataformas innovadoras y de fácil implementación ubicadas en la atmósfera superior. En reconocimiento de esta oportunidad, la WRC-15 adoptó la Resolución 160 para estudiar cómo facilitar el acceso a las aplicaciones globales de banda ancha entregadas por HAPs en el servicio fijo.

Se espera que las aplicaciones HAPs de banda ancha en el servicio fijo sirvan para varios escenarios, proporcionando acceso a Internet a los usuarios de medio a largo plazo. Puede ser un enlace a un punto de acceso o una conexión

de retorno para redes remotas. La capacidad puede variar para conectividad y casos de uso específicos. En cualquier caso, los HAPs proporcionará conexiones de servicio fijo entre una plataforma aérea HAPs y estaciones terrestres de servicio fijo temporales o permanentes.

En la resolución 160 de la WRC-15 se exponía las medidas reglamentarias de las plataformas HAPs dentro de las asignaciones de servicio fijo existentes. Se definían 3 regiones las cuales podrían usar un rango de frecuencias asignados; como se pueden ver en la tabla del punto 2.2.2.

El próximo día 28 de octubre del 2019 hasta el día 22 de noviembre de 2019, en Egipto, se va a realizar la conferencia de la WRC 19, donde se revisaran y, si es necesario, se modificara el Reglamento de Radiocomunicaciones, el tratado internacional que rige el uso del espectro de radiofrecuencia y las orbitas de satélites geoestacionarios y no geoestacionarios. Esta año, en el punto 1.14 se expondrán los HAPs.

El punto 1.14 del orden del día de la CMR-19 considera necesidades de espectro adicionales para enlaces gateways y terminales fijos para HAPs para proporcionar conectividad de banda ancha en el servicio fijo. Los estudios estiman que las necesidades de espectro para los sistemas HAPs son de 396 – 2.969 MHz para los enlaces de uplink y de 324-1.505 MHz para enlaces de downlink. Los estudios de compartición realizados por la ITU consideran los siguientes rangos de frecuencia: 6.440-6.520 MHz, 21.4-22 GHz y 24.25-27.5 GHz para la región 2, 27.9-28.2 GHz y 31-31.3 GHz, 38-39.5 GHz y 47.2-47.5 GHz y 47.9-48.2 GHz.

6.3.1 Resumen y análisis de los resultados de los estudios del ITU-R

Para realizar los estudios de la Resolución 160 (WRC-15), el ITU-R desarrolló los informes ITU-R F02438, donde se hablaba de la necesidad de espectro en los enlaces de banda ancha en HAPs que operan en servicio fijo, y el informe ITU-R F.2439 donde se estudia el despliegue y las características de las plataformas HAPs de banda ancha a distintas frecuencias.

Relacionado con las características y el despliegue de los HAPs, las características técnicas y operativas para entregar señales de banda ancha se encuentran en el informe ITU-R F.2439. Estas características se proporcionaron para desplegar HAPs para aplicaciones de banda ancha en las identificaciones

existentes y las identificaciones HAPs en las bandas de servicio fijo a 38-39.5 GHz (en todo el mundo) y 21.4-22 GHz y 24.25-27.5 GHz (solo Región 2).

Las aplicaciones HAPs de banda ancha servirán para varios casos de uso, proporcionando acceso a Internet de banda ancha a los usuarios a medio y largo plazo. La capacidad puede variar para conectividad y casos de uso específicos.

Según la definición de HAPs son plataformas que se mantienen en una posición fija en el aire, pero todos sufren algún tipo de movimiento a consecuencia del viento. Las administraciones deben notificar tolerancias a la BR para cumplir con sus requisitos.

Los enlaces gateway conecta HAPs con redes terrestres para comunicaciones de voz, datos y video, y para conectarse con proveedores de telefonía, de comunicaciones de banda ancha y transmisiones de tv y sonido. Los CPE para aplicaciones HAPs se entiende como los equipos para enlaces físicos en tierra que se comunican con los HAPs y distribuyen la conectividad hacia el usuario final, tanto inalámbricamente como conectado con cables. El CPE puede ser directo al acceso al hogar o puede ser un enlace a un punto de acceso.

Relacionado con la necesidad de espectro de los HAPs, las especificaciones existentes no se utilizaron en un pasado debido a condiciones físicas, técnicas y regulatorias. Los estudios que se han llevado a cabo sobre las necesidades de espectro para satisfacer la demanda de capacidad de HAPs demuestran que las necesidades de espectro para las aplicaciones de HAPs de banda ancha pueden no estar totalmente adaptadas a las identificaciones de HAPs actuales. Sin embargo, las identificaciones HAPs existentes pueden ser suficiente espectro para algunos casos de uso del sistema HAPs de banda ancha.

Dadas las identificaciones existentes para HAPs y al interés en facilitar acceso a las aplicaciones de banda ancha entregadas por HAPs, se estudiaron las necesidades de espectro para la entrega de banda ancha a través de enlaces HAPs en servicio fijo. Las necesidades de espectro cubren aplicaciones específicas y aplicaciones de conectividad. Estas necesidades de espectro se pueden ver en la tabla 1/1.14/2 del WRC-19. Los resultados de los estudios que estiman las necesidades de espectro total para los sistemas HAPs son: 396 – 2.969 MHz para los enlaces de uplink y de 324-1.505 MHz para enlaces de downlink. Las necesidades de espectro se basan en los rendimientos asumidos de HAPS, las densidades de usuario y la operación de un único HAPS en un área de cobertura determinada.

TABLE 1/1.14/2
Summary of spectrum needs

Capacity for		Forward		Return	
		GW to HAPS Ground-to-HAPS	HAPS to CPE HAPS-to-ground	CPE to HAPS Ground-to-HAPS	HAPS to GW HAPS-to-ground
Specific applications	MHz	110	15	15	110
Connectivity applications*	MHz	247-2 727	164-938	24-240	35-480

* The ranges are covering several possible use cases with different targeted markets.

Tabla 6.1: Tabla 1/1.14/2 del WRC-19

Para llevar a cabo los estudios de compartición y compatibilidad en los rangos de frecuencias se presentarán los siguientes escenarios:

- **Escenario 1:** Interferencia entre HAPs y satélites
- **Escenario 2:** Interferencia entre HAPs y servicios de comunicaciones fijos
- **Escenario 3:** Interferencia entre HAPs y servicios de comunicaciones móviles.
- **Escenario 4:** Interferencia entre HAPs y EEES (Earth exploration satellites services)
- **Escenario 5:** Interferencia entre HAPs y EEES/SRS (Earth exploration-satellites service/ space research services)
- **Escenario 6:** Interferencia entre HAPs y Inter Satellites
- **Escenario 7:** Interferencia entre HAPs y RAS (Sistemas de Radio Astronomía)

6.3.2. Métodos para cumplir el punto del día.

Para la satisfacción de los puntos del día, en primer lugar, se definen los métodos genéricos y luego se indican los métodos relevantes que serían más indicados a una banda de frecuencia. Los siguientes métodos se consideran en este punto del día y pueden aplicarse a posibles bandas de frecuencias candidatas. Los cambios se proponen a nivel mundial y no a nivel regional, además, las bandas propuestas podrían incluir identificaciones de banda total o parcial para los HAPs, así como limitaciones para garantizar la compatibilidad con los servicios existentes. Los métodos son:

- **Método A:** Sin cambios, las disposiciones vigentes en el RR no se modifican en la banda de frecuencias correspondiente.
- **Método B:** Identificación de las bandas o rangos de frecuencia dentro de las bandas conformes con la Resolución 160 (WRC-15). Dentro de este método existen varias opciones:
 - **Método B1:** Revisión de las disposiciones reglamentarias para HAPs en el servicio fijo con un estado primario en las bandas ya identificadas para HAPs
 - **Método B2:** Añadir nuevas identificaciones para los HAPs en bandas ya asignadas a servicio fijo con un estado primario.
 - **Método B3:** Añadir una asignación primaria al servicio fijo y una nueva identificación para los HAPs en la banda 24.25-5.25 GHz, en la región 2, donde no está asignado el servicio fijo.
- **Método C:** Suprimir la identificación HAPs existente, conforme con resolver 3 de la Resolución 160.

En la tabla siguiente se proporciona una descripción general de los métodos y las opciones relevantes que se consideran actualmente en este texto de la conferencia preparatoria de la WRC-19 en el tema del programa:

TABLE 1/1.14/4				
Summary of methods to satisfy the agenda item and associated frequency bands				
Section 1/1.14/	Bands	Methods and options		
		Method A	Method B	Method C
4.1/5.1	6 440-6 520 MHz	√	B1	√
4.2/5.2	6 560-6 640 MHz	√	Not proposed	√
4.3/5.3	21.4-22 GHz (R2 only)	√	B2	N/A
4.4/5.4	24.25-25.25 GHz (R2 only)	√	B3	N/A
4.5/5.5	25.25-27.5 GHz (R2 only)	√	B2	N/A
4.6/5.6	27.9-28.2 GHz	√	B1	√
4.7/5.7	31-31.3 GHz	√	B1	√
4.8/5.8	38-39.5 GHz	√	B2	N/A
4.9/5.9	47.2-47.5 GHz / 47.9-48.2 GHz	√	B1	√

Tabla 6.2: Tabla 1/1.14/4 del WRC-19

6.4 Futuros desafíos de investigación y desarrollo

Para poder superar las limitaciones actuales en el desarrollo de los HAPs, las primeras acciones que debemos tomar provienen de los aspectos normativos y comerciales. Estos aspectos son menos restrictivos en aplicaciones de defensa y seguridad debido a los escenarios actuales, pero se convierten en un obstáculo para las aplicaciones comerciales. Los aspectos normativos en el ámbito aeronáutico dependen mucho del tipo de plataforma, el caso más restringido se da cuando hablamos de HAPs como sistemas no tripulados.

Las diferentes aplicaciones que pueden ofrecer un HAPs requieren distinto nivel de potencia y de uso de espectro, algunos se pueden regular desde el mismo HAPs, pero otros dependerán de otros sistemas que trabajen en paralelo, como podría ser el GNSS para la navegación o para comunicaciones celulares.

Para poder trabajar coordinadamente con los satélites las especificaciones técnicas deberían adaptarse correctamente. Tanto las asignaciones de frecuencia, el PIRE disponible y los anchos de banda, lo que no solo afecta la posibilidad de compartir canales, codificaciones y modulaciones, sino que también podría ayudar a reducir el costo del desarrollo de la infraestructura si las bandas de frecuencia no requieren hardware diferente o antenas más grandes.

7. RUTAS DE MERCADO

El mercado de los HAPs es un mercado emergente después de varios años de intentos de emerger. Se prevé que en 2020 esté establecido los primeros HAPs para casos comerciales y que en el año 2025 estén funcionando 137 plataformas para distintas aplicaciones.

Una perspectiva sobre este mercado puede considerar tres aspectos: el producto, las aplicaciones relacionadas y los usuarios finales. El producto puede ser la plataforma aeronáutica; las aplicaciones pueden ser telecomunicaciones servicios de observación, vigilancia y navegación de la Tierra y los usuarios finales pueden ser entidades gubernamentales o privadas. Otra perspectiva puede incluir diferentes mercados relacionados con: la plataforma estratosférica, las diferentes cargas relacionadas con los servicios ofrecidos, las aplicaciones y la geografía específica.

Las principales oportunidades de mercado que podemos encontrar en los HAPs es proporcionar servicio móvil y de banda ancha de forma temporal en un área concreta, y la gran capacidad de cambio en la carga útil. También se prevé que una de las aplicaciones más usadas de los HAPs sea para las observaciones de Tierra.

Un informe de la Credence Research muestra que este mercado va a tener un valor potencial de cientos de millones de dólares en el año 2025. El mercado de equipos y servicios para HAPs será una fracción de esto. Algunos países, como el Reino Unido, están invirtiendo en HAPs, concretamente en el programa Zephyr y Airlander 10.

Un apartado en la investigación de los HAPs se basa en la mejora de la tecnología de la carga útil. Se investigará la reducción de tamaño y peso de la plataforma y de la antena, una mejoría de la batería y sistemas de alimentación para poder mantener la plataforma más tiempo al aire para poder proporcionar servicio durante más tiempo. Según los informes, los globos son el tipo más común de plataformas para los HAPs, porque parecen ser mucho más rentable que el uso de aeronaves, además de ser más sencillo de desarrollar.

Actualmente, la inversión en desarrollo de HAPs está dominado por los Estados Unidos, aproximadamente 35% del gasto global, seguido de Asia Pacífica con un 25%, Europa con un 18% y el 22 % en el resto del mundo.

En la siguiente tabla mostraremos la proyección de ingresos globales de HAPs del año 2016 al año 2030, según NSR.

Millones de dólares	2016	2020	2025	2030
Provisión de construcción, operación y servicio	402	584	857	1202
Servicios de comunicaciones	0.1	1.3	8.9	21.5
Servicios de imagen	45	75	146	264
Comunicaciones y equipos de carga	0.02	0.07	0.16	0.26

Tabla 7.1: Ingresos globales de HAPs de 2016-2030, según NSR.

La mayor parte del costo está en la construcción de la plataforma y las operaciones en tierra. Para las evoluciones de las previsiones futuras se creó un modelo basado en varios aspectos con los datos actuales de NSR, Euroconsult y Sunwynd. Algunas de las previsiones consideradas son en despliegue de 137 plataformas en el año 2025 con un crecimiento de aproximadamente 16 plataformas por año, según NSR; una penetración baja en los servicios de comunicaciones en un principio que crecerá sobre el 65% en el año 2030; los beneficios de servicio de imágenes y de servicio de comunicaciones se toman del informe de NSR.

Los ingresos presentados en la tabla son bajos debido a que el tamaño de la plataforma prevista es pequeño. Relacionado con los servicios de comunicaciones el beneficio es algo mayor, pero no es demasiado elevado. Los servicios de imagen son de mayor interés, en el año 2030 va a proporcionar unos beneficios de 264 millones de dólares aproximadamente.

La demanda de los HAPs puede estar relacionada con el presupuesto de las naciones en defensa y seguridad nacional. Los HAPs proporcionan una vigilancia excelente sobre grandes áreas. Como consecuencia de las crecientes amenazas terroristas y conflictos fronterizos, se pronostica que el gasto en HAPS para sistemas de vigilancia y seguridad se mantendrá elevado en los próximos años.

8. CONCLUSIONES

La integración de HAPs en las redes de comunicación actuales permitirá ofrecer un número más elevado de servicios a los usuarios, como acceso a conexión de banda ancha, observación de la tierra, teledetección entre muchas otras. También se podrían usar los HAPs para complementos a las redes terrestres y sistemas de comunicación por satélite de manera temporal, por ejemplo, para dar soporte a grandes eventos o para caso de desastre, o de manera permanente en regiones que tienen mala infraestructura para proporcionar servicio con las redes terrestres existentes o en zonas muy aisladas.

Las plataformas HAPs actualmente no son capaces de poder proporcionar servicio de gran duración. Se está estudiando la mejora de los sistemas de alimentación de los HAPs y de las baterías que llevan a bordo y proporcionan energía cuando no hay luz solar. También se está tratando de reducir el tamaño y el peso de la carga útil a bordo del HAPs.

Los HAPs operan a una altura que ya se considera espacio aéreo libre, pero en sus fases de despegue y aterrizaje deben cruzar el espacio aéreo. Se deberá obtener el permiso del estado para poder realizar despegues y aterrizajes, si no facilitara el permiso se tendría que buscar alternativas para no afectar el tráfico aéreo, una podría ser realizar los despegues sobre áreas militares, pero esta opción limitaría mucho el uso de HAPs debido a que se tendrían que usar HAPs que pudieran variar su posición para trasladarse al área donde tienen que proporcionar el servicio.

Otro de los mayores problemas que sufren las plataformas HAPs es la propagación de la señal, esto es debido a que las frecuencias asignadas para proporcionar servicio están localizadas a una banda de frecuencia que es muy sensible a fenómenos atmosféricos, provocando grandes atenuaciones que hacen que se tenga que transmitir a mucha más potencia o usar antenas con más ganancia, lo que hace que el peso de la carga útil aumente y pierda tiempo de servicio. En la reunión del WRC-19 se hablará de los HAPs y puede que se le asignen otros rangos de frecuencias, pudiendo hacer así que ya no sufran tantas pérdidas en la señal.

El mercado mundial considera los HAPs para fines de comunicaciones, observación de la Tierra y defensa y seguridad nacional. Grandes potencias están desarrollando tecnologías para fines de observación de la Tierra. El principal objetivo es poder conseguir sistema con múltiples aplicaciones que

satisfagan un coste económico factible y nunca en competición con los satélites que ofrecen los mismos servicios.

Actualmente, los sistemas de comunicación basado en HAPs se trata de una tecnología en investigación y con muchos aspectos sin definir, como el rango de frecuencias que van a usar o las limitaciones en el ámbito de la aeronavegación que van a tener. Estas tecnologías son capaces de proporcionar una gran cantidad de servicios, mejorando notablemente los existentes, y pudiendo hacer llevar servicios de banda ancha a zonas con infraestructuras débiles o que han sufrido un desastre. Por lo tanto, se considera que las tecnologías HAPs actualmente no son viables, pero en un futuro próximo puede ser una tecnología a tener muy en cuenta.

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

LIBROS

- Alejandro Aragón-Zavala, José Luis Cuevas-Ruíz, José A. Delgado Penín, Wiley. "High-Altitude Platforms for Wireless Communications"
- P. Davidson, H. E. Murray Hunt, and C. J. Burgoyne. High altitude platform" (2015, November 3)

ARTICULOS EN REVISTAS

- Flavio Araripe d'Oliveira, Francisco Cristovão, Lourenço de Melo, Tessaleno Campos Devezas "High-Altitude Platforms — Present Situation and Technology Trends"
- A. Aragón-Zavala, Member, IEEE, J.A. Delgado-Penín, Life Senior Member, IEEE and E. Bertran Alberti, Senior Member, IEEE "High-Altitude Pseudo-Satellites: a survey on recent developments, applications and trends for broadband and inter-system communications"
- Mohammad Mozaffari , Student Member, IEEE, Ali Taleb Zadeh Kasgari , Student Member, IEEE, Walid Saad , Fellow, IEEE, Mehdi Bennis , Senior Member, IEEE, and Mérouane Debbah, Fellow, "Beyond 5G With UAVs: Foundations of a 3D Wireless Cellular Network"
- V. Perello, G. Lopez-Risueño, R. Prieto-Cerdeira, C. Hernandez , J. Miguez, R. Ioannides, N. de Quattro " Exploring the usage of High Altitude Pseudo-Satellites to augment GNSS based Position and Timing", HAPS4ESA -, Noordwijk, Oct. 2017.
- A. A. M. Ezanuddin, M. F. Malek, P. J. Soh, and R. B. Ahmad. "Metamaterial entrenched circular microstrip antenna for Malaysia HAPS." In 2010 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Beijing, China, pp. 102-105, 12-16 Apr.2010
- S. Zvanoec, P. Piksa, M. Mazanek, P. Pechac. "A study of gas and rain propagation effects at 48 GHz for HAP scenarios" EURASIP Journal on Wireless Communicactions and Networking, Vol 2008

- A. Mohammed, A. Mehmood, F. N. Pavlidou, M. Mohorcic "The role of High-Altitude Platforms (HAPs) in the global wireless connectivity", Proceedings of the IEEE, vol. 99, Nov. 2011.
- ITU-R WP5C/TEMP/410 Annex 12-E: - "Spectrum needs of high altitude platform stations (HAPS) broadband links operating in the fixed service," Nov 2017.
- Stylianos Karapantazis And Fotini-Niovi Pavlidou "Broadband Communications Via High-Altitude Platforms: A Survey" University Of Thessaloniki
- A. Mohammed, A. Mehmood, F. Pavlidou, M. Mohoric, "The role os High-Altitude Plataforms (HAPs) in the global wireless connectivity"
- Stylianos Karapantazis And Fotini-Niovi Pavlidou "The role of high altitude plataforms in beyond 3G networks" University Of Thessaloniki
- Jialu Lun, David Grace, Nils Morozs, Paul Mitchell, Yi Chu, Abimbola Fisusi, Olusegun Awe, Ray E. Sheriff "TV White Space Broadband for Rural Communities Using Solar Powered High Altitude Platform and Terrestrial Infrastructures"
- M. Q. Vu, N.T. Nguyen, H.T. Pham and N.T. Dang, "All-optical twoway relaying free-space optical communications for HAP-based broadband backhaul networks", Optics Communications, Vol. 410, Mar. 2018.
- D. Grace, M. Mohorcic, J. Horwath, M. H. Capstick, M. Bobbio Pallavicini, and M. R. Fitch. "Communications from Aerial Platform Networks delivering Broadband for All–An Overview of the CAPANINA Project." Nov.2004

SITIOS WEB

- ITU: <https://www.itu.int/es/Pages/default.aspx>
- WRC-19 Item 1.14 : <https://www.itu.int/md/R15-WRC19PREPWORK-C-0028/en>
- Northern sky research: <https://www.nsr.com>
- Credence research: <https://www.credenceresearch.com/press/high-altitude-platforms-market>
- Agencia Espacial Europea: <http://www.esa.int>